

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

INFLUÊNCIA DE FATORES METEOROLÓGICOS NO PROJETO E
OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Dissertação submetida a Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

MARCO ALFREDO DI LASCIO

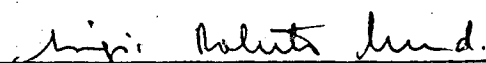
novembro - 1978

INFLUÊNCIA DE FATORES METEOROLÓGICOS NO PROJETO E

OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

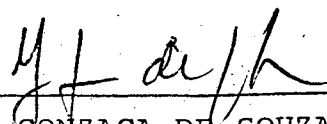
Candidato: MARCO ALFREDO DI LASCIO

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de - MESTRE EM CIÊNCIAS - Especialidade Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação.



Prof. SERGIO ROBERTO ARRUDA, M.Sc., D.I.C.

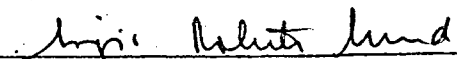
Orientador



Prof. LUIZ GONZAGA DE SOUZA FONSECA, D.Sc.

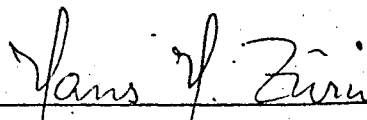
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. SERGIO ROBERTO ARRUDA, M.Sc., D.I.C.

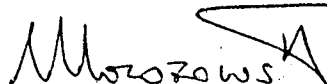
Presidente



Prof. HANS HELMUT ZURN, Ph.D.



Prof. LUIZ JAIME BRANCO MACHADO, Dr.Ing.



Prof. MARCIANO MOROZOWSKI FILHO, M.Sc.

À minha esposa

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Sergio Roberto Arruda, pela inestimável ajuda prestada na orientação deste trabalho.

Ao CNPq, a CNEN e a UFSC, pelo apoio financeiro.

A Diretoria de Eletrônica e Proteção ao Vôo, do Ministério da Aeronáutica, pelos dados meteorológicos cedidos.

A todos que colaboraram para tornar possível este trabalho, e particularmente as seguintes pessoas:

Prof. Hans Helmut Zurn

Prof. Luiz Jairo Branco Machado

Prof. Dinarte Américo Borba

Major Zygmundo Kusiak

Prof. Henry P. F. Broussolle

Aos funcionários do Departamento de Processamento de Dados da UFSC

R E S U M O

Os estudos referentes aos limites máximos de corrente de vido às temperaturas dos condutores aéreos das linhas de transmissão de energia elétrica, bem como aqueles referentes aos limites máximos de queda de tensão, foram efetuados em profundidade. Entretanto, o relacionamento entre estes dois limites era feito de maneira superficial, deixando margem a dúvidas durante a determinação dos parâmetros de projeto das linhas de transmissão.

Propõe-se, uma metodologia pela qual os planejamentos das empresas de energia elétrica possam determinar as condições técnicas para o projeto das linhas de transmissão, partindo dos parâmetros meteorológicos e das previsões de carregamento elétrico. Esta metodologia também servirá para estabelecer procedimentos que permitam a operação do sistema elétrico, i. e., o despacho de carga, estimar a capacidade de transporte de energia disponível nas linhas, desde que conhecidas as temperaturas ocorridas nas regiões onde passam as linhas, nas horas imediatamente anteriores.

Desta forma, as linhas de transmissão poderão ser melhor utilizadas, evitando-se limitações desnecessárias, principalmente durante as situações de contingência, quando normalmente ocorrem carregamentos imprevistos.

A B S T R A C T

Studies have been made in depth concerning maximum current capacities due to temperature in transmission lines, as well as concerning power limits due to voltage drop specifications. However, in the past the relationship between both limits was only considered superficially, thus raising doubts about the establishment of the design parameters of transmission lines.

A method is proposed which allows planners of power utility companies to define technical conditions for the design of transmission lines based on meteorological parameters and electrical load forecast. This method also serves to establish procedures for operation of a power system, i. e., load dispatch, estimation of energy carrying capacity based on the knowledge of the air temperatures occurring along the right-of-way of the lines during previous hours.

This way transmission lines may be better utilized, avoiding unnecessary limitations, mainly during contingency operations which usually cause unforeseen loadings.

S U M Á R I O

<u>SIMBOLOGIA</u>	S.1
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1.1
<u>CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS RELATIVOS AO AQUECIMENTO DE</u> <u>CONDUTORES AÉREOS NUS</u>	2.1
2.1. Tipos de Transmissão de Calor	2.1
2.2. O Calor num Condutor Aéreo	2.2
2.3. O Aquecimento em Condutores CAAA	2.2
2.3.1. Refrigeração Convectiva	2.2
2.3.2. Refrigeração por Irradiação	2.6
2.3.3. Aquecimento por Radiação Solar	2.6
2.3.4. O Balanço Total do Aquecimento	2.11
<u>CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DOS FENÔMENOS METEOROLÓGICOS RELACIONA</u> <u>DOS COM O AQUECIMENTO DE CONDUTORES AÉREOS</u> ...	3.1
3.1. O Vento	3.1
3.1.1. Ventos Devidos a Diferenças Locais de Temperatura	3.2
3.1.2. Circulação Geral na Atmosfera	3.3
3.1.3. Irregularidades na Velocidade do Vento Devido a Força de Atrito	3.4
3.1.4. Resumo dos Principais Fenômenos Eólicos que Influenciam o Limite Térmico de Con dutores Aéreos	3.5
3.2. A Radiação Solar	3.6
3.3. A Umidade na Atmosfera	3.9
3.4. O Dióxido de Carbono na Atmosfera	3.10
<u>CAPÍTULO 4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS METEOROLÓGICOS</u> <u>POR VIA COMPUTACIONAL</u>	4.1
4.1. O Arquivo de Dados	4.1
4.2. A Análise Estatística dos Dados Meteorológicos Arquivados	4.3
4.3. Resultados Obtidos a Partir de Dados Coletados na Região de Porto Alegre no Estado do Rio Grande do Sul	4.5

<u>CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE NOS CONDUTORES AÉREOS EM FUNÇÃO DO AQUECIMENTO</u>	5.1
5.1. Considerações Sobre as Variações que Influenciam no Aquecimento de Condutores Aéreos Nus ..	5.1
5.2. Cálculo Computacional das Capacidades Máximas de Transporte de Corrente em Condutores CAAA Aéreos	5.4
5.3. Limites Máximos de Transporte de Corrente num Cabo GROSBEAK	5.5
<u>CAPÍTULO 6 - FIXAÇÃO DE CRITÉRIOS OPERACIONAIS QUE LIMITAM ELETRICAMENTE A TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO</u>	6.1
6.1. Critérios Operacionais em Sistemas de Potência.	6.1
6.2. Relacionamento entre a Potência Natural e a Corrente Máxima Operacional de Linhas de Transmissão	6.4
6.3. Aplicação Prática	6.5
<u>CAPÍTULO 7 - METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DO LIMITE TÉRMICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO</u>	7.1
7.1. O Planejamento do limite Térmico de uma Linha de Transmissão	7.2
7.2. Exemplo de Determinação da Temperatura Máxima de Condutores Aéreos	7.4
<u>CAPÍTULO 8 - ESTIMAÇÃO HORÁRIOS DOS LIMITES DE CARREGAMENTO NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO</u>	8.1
8.1. O Problema do Limite Térmico Variável	8.1
8.2. A Operação com Limite Térmico Variável	8.2
<u>CAPÍTULO 9 - CONCLUSÕES</u>	9.1
<u>ANEXOS</u>	VOL.II
<u>BIBLIOGRAFIA</u>	B.1

SIMBOLOGIA

A	- Área da superfície metálica envolvida no processo de transferência calorífica; m^2
a	- Coeficiente de absorção calorífica por radiação
A'	- Maior área longitudinal de um condutor, m^2
C	- Capacitância por fase de uma linha de transmissão trifásica; farads / km
D_o	- Diâmetro externo do condutor; m
G	- Velocidade da massa de ar por unidade de seção; $kg / h.m^2$, de seção reta do condutor
H_c	- Altura do Sol em relação ao horizonte; graus
I_o	- Radiação solar recebida pela Terra, também chamada de constante solar; W / m^2
I	- Corrente eficaz de fase; A
I_M	- Valor eficaz máximo da corrente passante em cada fase de um sistema trifásico; Amperes
I_o	- Corrente natural de uma linha de transmissão; A
K_a	- Temperatura do ar, $^{\circ}K$
K_c	- Temperatura da superfície do condutor, $^{\circ}K$
k_f	- Condutividade térmica do ar na temperatura $T_f = (T_c - T_a) / 2$; $W . m / m^2 . ^{\circ}C$
L	- Indutância por fase de uma linha de transmissão trifásica; henrys / km
ℓ	- Comprimento de uma linha de transmissão; km ou m
P	- Potência trifásica; W
P_o	- Potência natural trifásica; W
Q_D	- Radiação solar direta, W / m^2

Q_d	- Radiação estelar, W / m^2
Q_s	- Radiação solar e estelar incidente sobre a superfície terrestre, W / m^2
q_c	- Quantidade de calor trocado entre um sólido e um fluido , por convecção forçada; watts
q_r	- Quantidade de calor perdido por um sólido por irradiação, W
q_s	- Quantidade de calor absorvido por um sólido por radiação solar e estelar; W
q_{cn}	- Quantidade de calor trocado entre um sólido e um fluido , por convecção natural; W / m
q_{ci}	- Quantidade de calor trocado entre um sólido e um fluido , por convecção forçada; W / m
q_{r_1}	- Quantidade de calor perdido por um sólido por irradiação; W / m
q_{s_1}	- Quantidade de calor absorvido por um sólido por radiação solar e estelar; W / m
r	- Resistência efetiva de um condutor à corrente alternada; ohms / m
r_{Ti}	- Resistência efetiva de um condutor à uma temperatura T_i ; ohms / m
T_a	- Temperatura ambiente; $^{\circ}C$
T_c	- Temperatura da superfície do condutor; $^{\circ}C$
T_f	- Temperatura média do filme; $^{\circ}C$
T_s	- Sobretemperatura de um condutor; $^{\circ}C$
V	- Velocidade do fluido; m / h
$ V_L $	- Tensão eficaz entre fases; Volts
$ V_N $	- Tensão eficaz fase-neutro; Volts
z_c	- Azimute do Sol; Graus

- z_o - Impedância natural de uma linha de transmissão; Ω
 z_ℓ - Azimute do condutor (o qual no sentido norte-sul tem $z_\ell = 180^\circ$) ; graus
 α - Coeficiente de variação da resistência em função de T_c
 ϵ - Coeficiente de emissividade de energia calorífica por irradiação
 θ - Ângulo de elevação do sol em relação ao horizonte; graus
 μ_f - Viscosidade absoluta do fluido à temperatura T_f ;
 $\text{kg} / \text{h} \cdot \text{m}$
 v - Coeficiente superficial de transferência calorífica;
 W / m^2 .
 ρ_f - Densidade do fluido; kg / m^3
 σ - Constante de Stefan-Boltzman, a qual vale $5,678 \dots 10^{-8}$
 $(\text{W} / \text{m}^2 / ^\circ\text{K}^4)$

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das técnicas relativas as linhas de transmissão de energia elétrica, teve início por volta de 1880 , simultaneamente com o aparecimento dos primeiros geradores e transformadores^(1.1).

A distância a percorrer sempre foi uma limitação severa aos sistemas de transmissão, e os engenheiros, desde o início, passaram a optar por tensões cada vez mais altas, a fim de possibilitar o atendimento às regiões mais afastadas. Ao mesmo tempo em que a tensão crescia aumentava a necessidade de melhor aproveitamento das instalações, e portanto o carregamento dos condutores, com o consequente aquecimento. Por outro lado, no dimensionamento das linhas, são fatores básicos não só o aquecimento, como também a queda da tensão, a estabilidade, a confiabilidade e as perdas.

Nos condutores aéreos, as limitações mais frequentes devido a temperatura são: a deformação permanente (estiramento) e a distância entre eles e o solo. Porém, esta última geralmente ocorre primeiro, devido aos critérios adotados pelo planejamento, o qual especifica o fluxo máximo para temperaturas entre 50 e 60°C, valores bem abaixo dos 180°C^(1.2) aceitos como o limite máximo de aquecimento para um condutor CAAA (cabo de alumínio com alma de aço).

Como a temperatura de um condutor aéreo depende da corrente elétrica e da refrigeração, sendo esta última totalmente incontrolável, não é simples, a determinação de um único limite máximo para o carregamento, exceto se forem adotados valores conservado

res, isto é, valores da maior temperatura ambiente possível de ocorrer na região, em conjunto com a situação de vento nulo.

De um modo geral pode ser estabelecido que a temperatura T_c , de um condutor aéreo, fica determinada pela seguinte equação:

$$T_c = T_a + T_s \quad (^{\circ}\text{C}) \quad (1.1)$$

onde T_a é a temperatura ambiente e T_s é o incremento na temperatura do condutor devido a corrente elétrica e a radiação solar, também chamada de sobre-temperatura.

Como a sobre-temperatura está relacionada com a refrigeração, alguns fatores são importantes para a determinação de T_s , tais como: a velocidade do vento, as características térmicas do condutor e a corrente elétrica.

Os estudos referentes aos limites máximos de corrente devido às temperaturas dos condutores, bem como, aqueles referentes aos limites máximos de queda de tensão, foram efetuados em profundidade. Entretanto, o relacionamento entre estes dois limites era feito de maneira superficial, deixando margem a dúvidas durante a determinação dos parâmetros de projeto das linhas de transmissão.

Propõe-se então, uma metodologia pela qual os planejamentos das empresas de energia elétrica possam determinar as condições técnicas para o projeto das linhas de transmissão, partindo dos parâmetros meteorológicos e das previsões de carregamento elétrico. Esta metodologia também servirá para estabelecer procedimentos que permitam a operação do sistema elétrico, i.e., o despacho de carga, estimar simplificadaamente a capacidade de transporte de energia disponível nas linhas de transmissão, desde que conhecidas as configurações e as temperaturas ocorridas nas regiões onde passam as linhas, nas horas imediatamente anteriores.

O trabalho desenvolvido consta das seguintes partes:

- 1º - O estudo dos fenômenos térmicos e meteorológicos , diretamente relacionados com o aquecimento dos condutores aéreos nus;
- 2º - A determinação de um método que possibilite obter as temperaturas dos condutores em função da corrente e levando em conta os parâmetros meteorológicos;
- 3º - A escolha de critérios que permitam estabelecer qual a maior corrente possível de ser transportada numa linha de transmissão sem levar em conta o aquecimento dos condutores;
- 4º - A proposição de um roteiro que possibilite determinar a máxima temperatura de projeto para os condutores de uma linha de transmissão, considerando os parâmetros meteorológicos simultaneamente com a maior corrente possível de ser transportada.

Desta forma, as linhas de transmissão poderão ser melhor utilizadas, evitando-se limitações desnecessárias, principalmente durante "as contingências", quando normalmente ocorrem situações imprevistas de carregamento.

Como trabalho complementar, é aproveitada a experiência adquirida para sugerir aos despachos de carga uma maneira de prever, com algumas horas de antecedência, qual o limite máximo de corrente possível de ser transportado nas linhas de transmissão.

C A P Í T U L O 2

CONCEITOS BÁSICOS RELATIVOS AO AQUECIMENTODE CONDUTORES AÉREOS NUS

O objetivo deste capítulo é estabelecer conceitos básicos, relativos ao aquecimento de condutores aéreos nus, para utilização no decorrer desta dissertação.

2.1 - Tipos de Transmissão de Calor

Os tipos de transmissão de calor normalmente reconhecidos são: condução, convecção e radiação. Havendo em comum o fato de que estes fenômenos somente ocorrem quando existe diferença de temperatura. Sendo importante ressaltar que o calor sempre flui na direção de meios que estejam com temperatura mais baixa.

Condução Calorífica é um fenômeno da matéria que permite a passagem da energia calorífica, mesmo sendo o corpo impermeável a qualquer tipo de raio e não estando suas partes em movimento relativo entre si, mas havendo um gradiente de temperatura.

Convecção é a faculdade pela qual uma matéria em movimento, carrega energia calorífica de um lugar a outro:

Radiação é a emissão ou absorção pela matéria de diferentes tipos de raios transportadores de energia calorífica. Em outras palavras, a radiação ocorre quando o calor flui de um corpo para outro estando os mesmos separados entre si, podendo até mesmo existir o vácuo entre eles.

2.2 - O Calor num Condutor Aéreo

No caso do condutor aéreo na condução, a radiação e a convecção, estão atuando continuamente e distribuídas do seguinte modo: No interior do condutor, o aquecimento devido à passagem da corrente elétrica é transmitido até a superfície por condução. A superfície do condutor troca calor com o meio ambiente principalmente por convecção. A radiação contribui no processo térmico da superfície em menor monta que a convecção e funciona tanto para emissão do calor interno como para recepção da energia solar.

O único tipo de aquecimento do condutor, por fontes externas de calor, a interessar, é o devido a energia calorífica do sol recebida por radiação. Esta afirmativa é justificada pelo fato de que apenas as temperaturas do condutor acima de 50°C serão pesquisadas e portanto será impossível a transferência de calor do exterior por convecção, condução e radiação partindo de meios que estejam a temperaturas inferiores.

2.3 - O Aquecimento em Condutores CAAA

Como a maioria das linhas aéreas de transmissão de energia elétrica emprega condutores CAAA (Cabo de Alumínio com Alma de Aço), este será o único tipo de cabo a ser aqui analisado.

2.3.1 - Refrigeração Convectiva

As noções básicas sobre refrigeração convectiva são dadas por McAdams (ver referência 2.1).

A troca de calor por convecção, entre a superfície de um sólido e um fluido, é dada por

$$q_c = v \cdot A (T_c - T_a) \quad (W) \quad (2.1)$$

onde, v é o coeficiente de transmissão de calor entre uma superfície e um fluido, A é a área superficial do sólido, T_c sua temperatura e T_a é a temperatura do fluido.

Em 1958, House & Tuttle^(2.2) concluíram que no caso de condutores aéreos o número de Reynolds* iria abranger grandes faixas, sendo necessário o uso da equação,

$$\frac{v \cdot D_o}{k_f} = B_1 + B_2 \left(\frac{D_o \cdot G}{\mu_f} \right)^m \quad (2.2)$$

na qual B_1 , B_2 e m , são adimensionais e são retirados da Tabela 2.1

$D_o \cdot G / \mu_f$	m	B_1	B_2
0,1 - 1.000	0,52	0,32	0,43
1.000 - 50.000	0,60	0,0	0,24

Tabela 2.1 - Valores de B_1 , B_2 e m .

Fazendo o comprimento de um condutor igual a ℓ e substituindo a equação (2.2) em (2.1)

$$q_c = \left[B_1 + B_2 \left(\frac{D_o \cdot G}{\mu_f} \right)^m \right] \frac{k_f \cdot \pi \cdot \ell \cdot D_o}{D_o} (T_c - T_a) \quad (W) \quad (2.3)$$

(*) O número de Reynolds é adimensional e sai da relação $D_o \cdot G / \mu_f$ onde D_o é o diâmetro externo do condutor em metros, G é a velocidade de massa por unidade de seção em $kg / h \cdot m^2$ e μ_f é a viscosidade absoluta do ar em $kg / h \cdot m$.

Como G é o produto da densidade do ar ρ_f , pela velocidade V (perpendicular ao condutor), reescreve-se a equação (2.3),

$$q_c = \left[B_1 + B_2 \left(\frac{D_o \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^m \right] k_f \cdot \pi \cdot \ell (T_c - T_a) \quad (W) \quad (2.4)$$

Dependendo do valor do número de Reynolds, a equação (2.4) toma as seguintes formas:

Para nº de Reynolds entre 0,1 e 1.000,

$$q_c = \left[1,01 + 1,35 \left(\frac{D_o \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0,52} \right] k_f \cdot \ell (T_c - T_a) \quad (W) \quad (2.5)$$

e para nº de Reynolds entre 1.000 e 50.000,

$$q_c = 0,75 \left(\frac{D_o \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0,60} k_f \cdot \ell (T_c - T_a) \quad (W) \quad (2.6)$$

A viscosidade, a densidade e a condutividade térmica do ar, são dadas na Tabela 2.2. A escolha da temperatura T_f , para determinação destes parâmetros é feita através da fórmula,

$$T_f = \frac{T_c + T_a}{2} \quad (^{\circ}C) \quad (2.7)$$

sendo T_f , a temperatura média da película que envolve o condutor.

A direção do vento tem influência significativa na quantidade de calor trocado convectivamente, atingindo este um máximo quando a incidência é perpendicular ao eixo do condutor e reduzindo-se em 60%, quando o fluxo circula paralelamente (2.2).

Para o caso de ser considerado o ar sem deslocamento algum deverá ser empregada a equação estabelecida por Davis (2.3), onde a energia cedida por convecção torna-se:

Temperatura		Viscosidade absoluta	Densidade ρ_f		Condutividade térmica
(°C)	(°K)	(μ_f)	(0m)	(1525m)	(k_f)
0	273	0,0618	1,293	1,075	0,0242
5	278	0,0627	1,270	1,057	0,0246
10	283	0,0635	1,248	1,038	0,0250
15	288	0,0644	1,225	1,019	0,0254
20	293	0,0653	1,204	1,003	0,0257
25	298	0,0661	1,185	0,987	0,0261
30	303	0,0670	1,166	0,971	0,0265
35	308	0,0679	1,147	0,955	0,0268
40	313	0,0686	1,128	0,939	0,0272
45	318	0,0695	1,110	0,924	0,0276
50	323	0,0704	1,094	0,910	0,0280
55	328	0,0711	1,076	0,895	0,0283
60	333	0,0720	1,059	0,881	0,0287
65	338	0,0728	1,044	0,868	0,0291
70	343	0,0735	1,030	0,857	0,0295
75	348	0,0744	1,015	0,844	0,0298
80	353	0,0752	1,004	0,836	0,0302
85	358	0,0759	0,987	0,822	0,0306
90	363	0,0766	0,974	0,810	0,0309
95	368	0,0775	0,959	0,798	0,0312
100	373	0,0783	0,947	0,788	0,0317

Tabela 2.2 - Valores da viscosidade absoluta, densidade e condutividade térmica do ar em função da temperatura

μ_f (kg / h . m); ρ_f (kg / m³); k_f (W / m . °C)

$$q_{cn} = 0,2634 \cdot (39,37 \cdot D_o)^{0,75} \cdot (T_c - T_a)^{1,25} \quad (W / m) \quad (2.8)$$

2.3.2 - Refrigeração por Irradiação

A perda de calor de um condutor pelo fenômeno da irradiação é dada pela expressão

$$q_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot A (K_c^4 - K_a^4) \quad (W) \quad (2.9)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, a qual vale $5,678 \cdot 10^{-8} \quad (W / m^2 / ^\circ K^4)$. A variável ϵ é a constante de emissividade térmica, a qual para condutores novos vale 0,23 e para os enegrecidos 0,91^(2.4).

Para um condutor aéreo a equação (2.9) toma o seguinte aspecto,

$$q_r = \sigma \cdot \epsilon \cdot \pi \cdot D_o \cdot \ell (K_c^4 - K_a^4) \quad (W) \quad (2.10)$$

substituindo σ e π pelos seus valores,

$$q_r = 17,84 \cdot \epsilon \cdot D_o \cdot \ell \left[\left(\frac{K_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{K_a}{100} \right)^4 \right] \quad (W) \quad (2.11)$$

2.3.3 - Aquecimento por Radiação Solar

O aquecimento de condutores aéreos devido à radiação solar, depende principalmente da altura do Sol em relação ao horizonte e da transparência da atmosfera.

Como a Terra possui seu eixo inclinado de $23^\circ 27'$ em relação à perpendicular ao plano da órbita por ela executada em torno do Sol, existe a ocorrência de dias com diferentes períodos de duração. No Hemisfério Sul os dias têm mais de 12 horas de duração entre 23 de setembro a 21 de março e neste período o Sol permane-

ce sempre ao sul do equador, havendo portanto, incidência direta da radiação solar.

A radiação solar jamais incide verticalmente nas latitudes superiores a $23^{\circ}27'$, onde está situada a quase totalidade da região sul do Brasil inclusive a cidade de Curitiba cuja latitude é $25^{\circ}25'$ e para a qual foram generalizados os dados que determinam a posição do Sol nos diferentes períodos do ano.

Desta forma, a Tabela 2.3 (referente a latitude de Curitiba) apresenta pequeno erro para as latitudes mais ao norte e uma margem de segurança no restante.

A quantidade de calor solar e estelar, recebido por um condutor é obtido por ^(2.1),

$$q_s = a (Q_D \cdot \text{sen}\theta + Q_d) A' \quad (W) \quad (2.12)$$

onde, Q_D é a radiação solar direta, Q_d é a radiação estelar, θ e os raios solares, a é o coeficiente de absorção calorífica por radiação, com valores entre 0,23 a 0,97 dependendo do estado do condutor e finalmente A' é a área da maior seção longitudinal que passa pelo eixo do condutor.

A Tabela 2.4, mostra os valores médios da radiação solar e estelar em conjunto, sendo

$$Q_s = Q_D + Q_d \quad (W / m^2) \quad (2.13)$$

A simplificação introduzida por (2.13) acarreta em pequeno erro pois a radiação estelar não depende do ângulo de incidência, porém, este erro não influirá no resultado final ^(2.4).

A equação (2.12), torna-se então,

$$q_s = a \cdot Q_s \cdot \text{sen}\theta \cdot A' \quad (W) \quad (2.14)$$

Tabela 2.3 - Altura do Sol em relação ao horizonte e seu azimute correspondente, ambos para a latitude de Curitiba^(2.5).

Solstício de Verão (21 / 12)								
Hora	05h12'	06h00'	07h00'	08h00'	09h00'	10h00'	11h00'	12h00'
Altura do Sol (H_c)	00°00'	09°50'	22°40'	35°49'	49°22'	69°44'	76°11'	88°02'
Azimute do Sol (Z_c) *	63°49'	68°36'	73°48'	78°27'	84°59'	88°16'	95°02'	180°00'
Hora	18h48'	18h00'	17h00'	16h00'	15h00'	14h00'	13h00'	12h00'

Equinócios (21 / 03 e 23 / 09)								
Hora		06h00'	07h00'	08h00'	09h00'	10h00'	11h00'	12h00'
Altura do Sol (H_c)		00°00'	13°32'	26°51'	39°42'	51°28'	60°48'	64°35'
Azimute do Sol (Z_c) *		90°00'	83°25'	76°05'	66°46'	53°22'	31°45'	00°00'
Hora		18h00'	17h00'	16h00'	15h00'	14h00'	13h00'	12h00'

* O valor de Z_c para o período da tarde é obtido subtraindo de 360° o valor dado pela tabela.

Tabela 2.3 (Continuação) - Altura do Sol em relação ao horizonte e seu azimuth correspondente, ambos para a latitude de Curitiba^(2.5).

Solstício de Inverno (21 / 06)								
Hora	-	06h48'	07h00'	08h00'	09h00'	10h00'	11h00'	12h00'
Altura do Sol (H_c)	-	00°00'	02°31'	14°07'	24°31'	33°09'	39°03'	41°08'
Azimuth do Sol (Z_c)*	-	63°55'	62°30'	55°51'	45°29'	33°14'	17°48'	00°00'
Hora	-	17h12'	17h00'	16h00'	15h00'	14h00'	13h00'	12h00'

* O valor de Z_c para o período da tarde é obtido subtraindo-se de 360° o valor dado pela tabela.

O ângulo θ , para o caso de um condutor redondo em situação horizontal é dado por,

$$\theta = \cos^{-1} (\cos H_c \cdot \cos (Z_c - Z_\ell)) \quad (\text{graus}) \quad (2.15)$$

onde, H_c é a altura do Sol em relação ao horizonte, Z_c é o azimuth do Sol e Z_ℓ é o azimuth do condutor (o qual no sentido norte-sul tem $Z_\ell = 180^\circ$).

Altura do Sol H_c (Graus)	Aquecimento recebido*	
	Atmosfera limpa Q_s (W / m ²)	Atmosfera industrial Q_s (W / m ²)
5	233,6	135,6
10	432,7	240,0
15	583,4	328,3
20	693,2	421,9
25	769,6	501,6
30	828,8	570,5
35	877,3	618,9
40	912,8	662,0
45	940,8	694,3
50	968,8	726,6
60	1000,0	770,7
70	1022,6	809,4
80	1031,2	833,1
90	1037,6	849,3

* Para uma atitude de 1500m os valores desta tabela devem ser multiplicados por 1,15.

Tabela 2.4 - Valores de energia solar e estelar em função da altura do Sol sobre o horizonte (2.4).

2.3.4 - O Balanço Total do Aquecimento

A corrente passante $|I|$ em um condutor, no que tange a refrigeração, depende da resistência efetiva r e das quantidades de calor trocados com o meio circundante.

O valor de r varia com a temperatura, sendo determinado através da seguinte equação:

$$r_{T_2} = r_{T_1} (1 + \alpha_{T_1} (T_2 - T_1)) \quad (\Omega / m) \quad (2.16)$$

onde, α é o coeficiente de variação da resistência e é assumido linear para valores entre 20 e 180°C, sendo para $T_1 = 20^\circ\text{C}$,

$\alpha_{20} = 0,000403$ para 61% de condutividade ASTM do CAAA.

Como q_c , q_r e q_s foram deduzidos para a área total do condutor será necessário, para fins de coerência com as unidades de r (as quais estão em Ω / m), redefini-las do seguinte modo:

Para n° de Reynolds entre 0,1 e 1.000, a equação (2.5) fica transformada em,

$$q_{c_1} = \left[1,01 + 1,35 \left(\frac{D_o \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0,52} \right] k_f (T_c - T_a) \quad (W / m) \quad (2.17)$$

e para n° de Reynolds entre 1.000 e 50.000, a equação (2.6) é substituída por,

$$q_{c_1} = 0,75 \left(\frac{D_o \cdot \rho_f \cdot V}{\mu_f} \right)^{0,60} k_f (T_c - T_a) \quad (W / m) \quad (2.18)$$

No caso de q_r a equação (2.11) fica transformada em,

$$q_{r_1} = 17,84 \cdot \epsilon \cdot D_o \left[\left(\frac{K_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{K_a}{100} \right)^4 \right] \quad (W / m) \quad (2.19)$$

Para o calor recebido pela radiação solar, a equação (2.14) adquire a seguinte forma,

$$q_{s_1} = a \cdot Q_s \cdot \sin\theta \cdot D_o \quad (W / m) \quad (2.20)$$

Deste modo, no estado permanente e com vento a corrente passante é regida pela equação,

$$|I| = \sqrt{\frac{q_{c_1} + q_{r_1} - q_s}{r}} \quad (A) \quad (2.21)$$

Já para o caso da não existência de vento, a corrente I é obtida por:

$$|I| = \sqrt{\frac{q_{cn} + q_{r_1} - q_s}{r}} \quad (A) \quad (2.22)$$

onde, a única diferença com a equação (2.21) é a substituição de q_{c_1} por q_{cn} o qual é determinado através de (2.8).

C A P Í T U L O 3

ANÁLISE DOS FENÔMENOS METEOROLÓGICOS RELACIONADOS
COM O AQUECIMENTO DE CONDUTORES AÉREOS

A intenção deste capítulo é apresentar, concisa e sistematicamente uma introdução à ciência da meteorologia, no que tange aos fenômenos relacionados com o aquecimento dos condutores aéreos, tais como: o vento, a radiação solar, etc. Havendo como principal propósito a exposição dos fatos e dos princípios concernentes à con du ta e às reações da atmosfera, de maneira a possibilitar uma análi se desses parâmetros meteorológicos.

3.1 - O Vento

O vento é o ar em movimento horizontal e os deslocamentos verticais são comumente chamados de correntes.

Tanto o vento como as correntes estão intimamente relacionados com as diferenças de pressão da atmosfera, as quais surgem devido diferenças na densidade do ar, ocasionadas pelas variações na temperatura^(3.1).

O fluxo do vento se faz sempre no sentido das pressões mais baixas e será mais intenso, quanto maior for a diferença da densidade e portanto da pressão, a qual, considerada no sentido horizontal em relação a uma dada distância é chamada gradiente de pressão, sendo o vento uma função deste gradiente.

A *direção do vento* é considerada de onde ele flui, na escala em graus, de 001 a 360°, no sentido horário, no qual 360° representa o norte e 180° o sul. Quando a direção do vento se apresen

ta muito irregular, ele é chamado de vento variável^(3.2).

A *velocidade do vento* representa a distância percorrida por uma partícula da atmosfera na unidade de tempo. Ela é sempre um valor médio de velocidade, pois, devido as variações de temperatura, pressão e massa específica do ar, as partículas de um vento não podem deslocar-se à uma mesma velocidade^(3.2).

O *carater do vento* vem a ser a continuidade ou descontinuidade do seu fluxo. Quando a velocidade média varia muito rapidamente; por exemplo, 10 ou mais nós num período de até 20 segundos, o vento é chamado vento de rajada e é geralmente variável^(3.2).

A *turbulência do vento* representa o efeito que as rajadas provocam no ar^(3.2).

3.1.1 - Ventos Devido a Diferenças Locais de Temperatura

A variação mais rápida da temperatura do solo em relação à da água, provoca ao longo dos litorais os fenômenos conhecidos como brisa marítima e brisa terrestre.

A *brisa marítima* ocorre com maior intensidade à tarde no verão, quando o ar mais aquecido sobre o solo expande-se, criando correntes ascendentes, diminuição de densidade e consequente queda de pressão, fazendo o ar circular desde a superfície líquida, onde a pressão é mais alta, em direção a terra. De maneira inversa ocorre a *brisa terrestre* a qual é mais intensa na madrugada durante o inverno. Sendo ambos, ventos locais com suas intensidades dependentes das áreas de terra e água envolvidas^(3.2).

A *brisa dos vales* é provocada pelo aquecimento do fundo dos vales durante o dia, quando são geradas correntes ascendentes as quais, ajudadas pelo aquecimento das encostas, podem resultar em fortes brisas. Já, em certos vales costeiros, a brisa marítima e a do vale podem juntas ocasionar fortes ventos^(3.2).

A brisa de montanha é resultante do resfriamento mais rápido do ar próximo às encostas e aos platôs, que do ar livre a alguma distância deles, ou no fundo dos vales. A brisa de montanha é um fenômeno noturno e tem maior intensidade quando existe água no fundo dos vales, provocando uma descida mais rápida do ar frio e denso^(3.2).

Desses quatro tipos de ventos locais, os que mais afetam o limite máximo de temperatura de uma linha de transmissão são as brisas marítimas e dos vales, pois ocorrem principalmente à tarde durante o verão, justamente quando as temperatura são mais altas.

Também de ocorrência mais frequente, durante os dias mais quentes, são os ventos devido às nuvens de trovoadas e cujas intensidades próximo à superfície geralmente ultrapassam 30 km/h na horizontal^(3.1).

3.1.2 - Circulação Geral na Atmosfera

A distribuição da temperatura sobre o globo terrestre, onde existe uma predominância de decréscimo na direção dos polos, cria um fluxo de ar, o qual transporta o calor do equador para os polos. Este movimento é gerado pelo aquecimento da atmosfera na região do equador, onde aparece um fluxo ascendente, existindo ao mesmo tempo fenômenos opostos e iguais em ambos os polos. Dessa maneira, o ar se eleva nas latitudes equatoriais, desloca-se em altitude na direção dos polos, descendo sobre eles e retornando nos níveis inferiores para o equador. Porém, esse fluxo não ocorre de maneira contínua devido a influência do fenômeno de Coriolis e das forças centrífuga, gravitacional e de atrito.

De uma maneira geral a direção e a velocidade do vento, devido à circulação global da atmosfera, podem ser analisadas esta-

tisticamente pois ambas tem caráter cíclico acompanhando as estações do ano.

3.1.3 - Irregularidades na Velocidade do Vento

Devido à Força de Atrito

No estudo da influência dos fenômenos eólicos sobre o limite térmico de linhas de transmissão é necessário dar um destaque especial à redução da velocidade do vento devido à força de atrito, pois variações de 1 a 3 ou mais nós* têm sido verificadas para cada metro de altura, significando variações de 10 a 30 ou mais nós em apenas dez metros de espessura^(3.2). Sendo essas variações mais intensas quando ocasionadas por um ou mais dos seguintes fatores: a) inversões muito acentuadas nas temperaturas motivadas pelo resfriamento rápido das noites claras e calmas; b) massas de ar aquecido se superpondo ao ar frio e denso; c) nuvens de trovoadas.

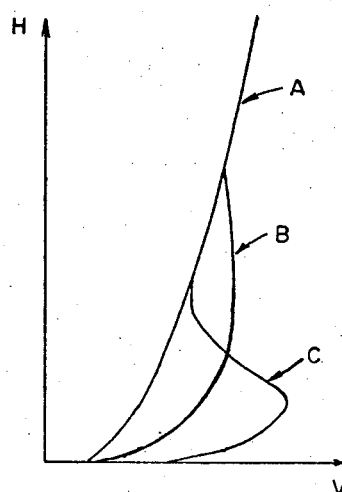
De uma maneira geral, a velocidade do vento em relação aos primeiros metros de altura sobre o solo, distribui-se conforme a Figura 3.1, onde aparece a influência dos diferentes tipos de terreno, os quais são genericamente, o plano, o curvo e o em forma de picos^(3.3).

Através da Figura 3.1 nota-se que para as velocidades muito baixas praticamente não há influência do relevo na velocidade do vento.

(*) 1 nó = 1872 m/hora

1 nó = 1 kt (kt = milha náutica por hora)

Figura 3.1 - Influência dos três principais tipos de relevo na velocidade do vento em relação à altura do solo, onde cada curva representa a variação sobre terreno: A) plano; B) ondulado e C) formando picos.



3.1.4 - Resumo dos Principais Fenômenos Eólicos que Influenciam o Limite Térmico de Condutores Aéreos

Pelo que foi visto nos itens 3.1.1 e 3.1.2, pode-se concluir que, para o período das maiores temperaturas ambientes, também deverá ocorrer alguma intensidade de vento devido às brisas marítimas e dos vales ou por causa de trovoadas. Desta forma, o conceito da maior temperatura sem vento parece não existir. Na prática pode ser aceito um valor mínimo de vento de 2 pés/s (1,1857 nós), para as horas mais quentes, parâmetro este, baseado em Davis^(3.4), Beers^(3.5) e Gorub^(3.6), sendo considerado ainda suficiente para possibilitar o uso das equações desenvolvidas no capítulo 2.

Por outro lado, o item anterior mostrou que, com o aumento da intensidade do vento, cresce também sua indeterminação ao lon-

go da linha, tornando difícil uma estimativa exata da refrigeração convectiva.

3.2 - A Radiação Solar

O Sol ocupa um dos focos da elipse traçada no espaço, pela Terra, verificando-se o ponto mais próximo, o *periélio*, no dia 22 de dezembro e o mais afastado, o *afélio*, a 21 de junho, recebendo o nome genérico de *solstícios*. Ao descrever sua órbita a Terra dá ao mesmo tempo, uma volta completa em torno de seu eixo polar a cada 24 horas, mantendo uma inclinação constante de $23^{\circ}27'$ com o plano da órbita, fazendo o Sol incidir diretamente sobre o Hemisfério Sul na época do periélio. O oposto ocorre para o Hemisfério Norte, onde o Sol incide verticalmente no verão, quando se encontra mais afastado da Terra^(3.2).

Esses fatos, a primeira vista parecem levar a existência de verões e invernos muito mais intensos no Hemisfério Sul. No entanto, a maior superfície de água existente no sul, funciona como amortecedor amenizando as variações.

A medida da intensidade da radiação solar recebida pela Terra é chamada de constante solar I_0 , sendo definida como a quantidade de energia que chega a uma superfície plana, exterior à atmosfera, colocada perpendicularmente aos raios solares, estando a Terra na sua distância média do Sol. Alguns dos valores encontrados estão relacionados na Tabela 3.1.

Como a quantidade de radiação solar recebida por um condutor sofre a atenuação da atmosfera, a qual tem opacidade variável o valor de I_0 adotado por House & Tuttle^(3.7), pode ser mantido da mesma forma que na Tabela 2.4, utilizada no Capítulo 2, e representada graficamente na Figura 3.2.

Autor	I_o (W / m ²)
House & Tuttle ^(3.7)	1324
Davis ^(3.8)	1322
Davis ^(3.8)	1395
Davis ^(3.8)	1353

Tabela 3.1 - Valores da constante solar I_o , sem a atenuação provocada pela atmosfera.

Analisando a Figura 3.2, nota-se na curva A (atmosfera limpa), uma tendência de alocação dos valores de insolação em torno dos 1000 (W / m²), quando o Sol atinge ângulos superiores a 40°, posição onde ele estará no período das 09h00 às 15h00, entre 23 de setembro a 21 de março, de acordo com a Tabela 2.3.

Faixas horárias		06h às 09h (W / m ²)	09h às 15h (W / m ²)	15h às 18h (W / m ²)	18h às 06h (W / m ²)
Estações do ano	atmosfera				
Primavera e Verão	limpa	900,0	1000,0	900,0	0,0
	industrial	700,0	800,0	700,0	0,0
Outono e Inverno	limpa	800,0	900,0	800,0	0,0
	industrial	600,0	700,0	600,0	0,0

Tabela 3.2 - Valores de Q_s simplificados das Tabelas 2.3 e 2.4. Mantendo-se o fator de correção de 1,15 quando a tabela for utilizada para altitudes em torno de 1500m.

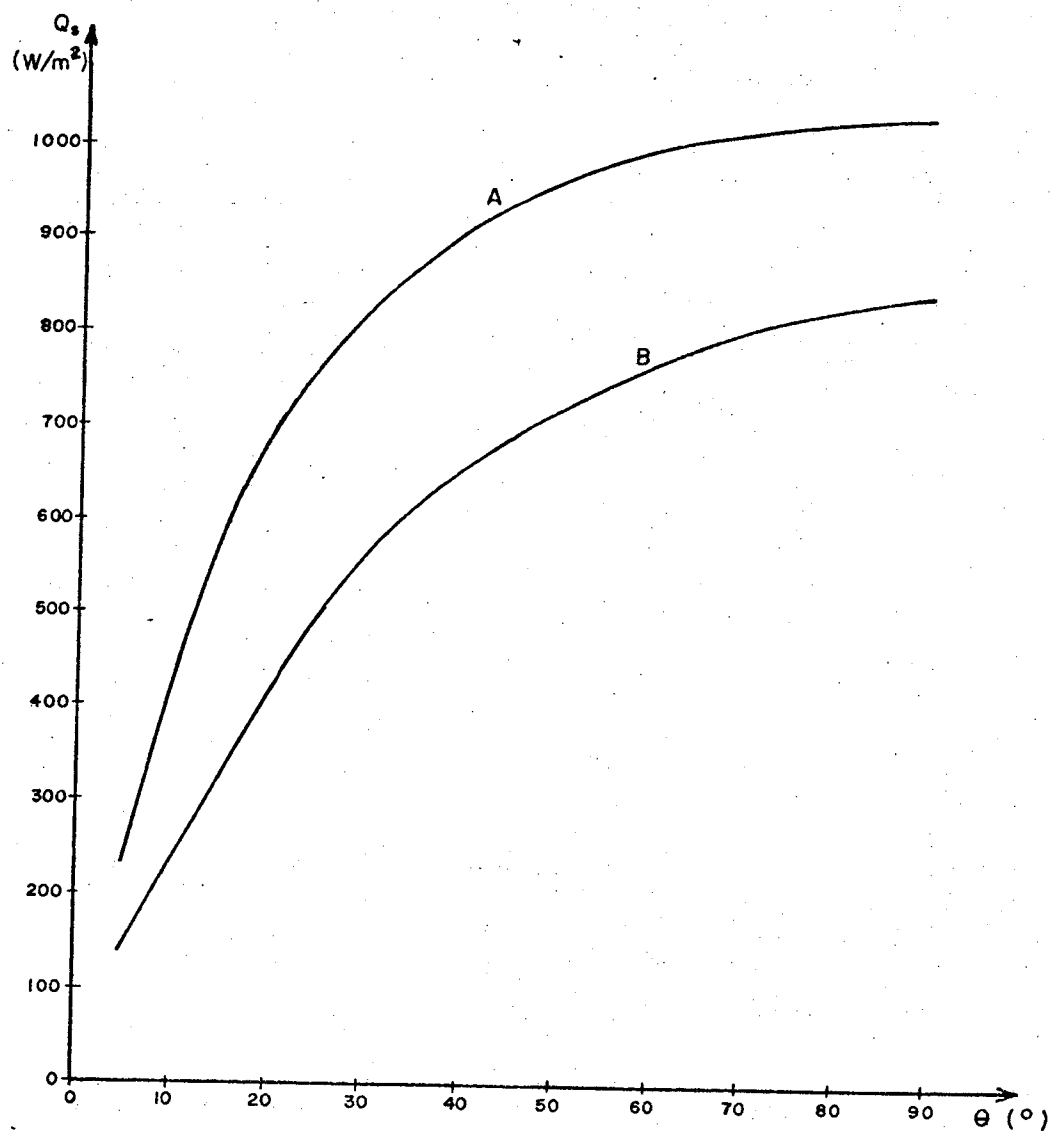


Figura 3.2 - Quantidade de energia solar incidente na superfície terrestre em função da altura do sol, em relação ao horizonte e de acordo com a Tabela 2.4.

Através de comparações semelhantes é possível transformar as Tabelas 2.3 e 2.4 na Tabela 3.2, na qual os dados de Q_s são obtidos por faixas e foram desprezados os azimutes do Sol sendo portanto os raios solares considerados sempre incidentes na perpendicular com o condutor, o que representa uma simplificação em favor da segurança.

3.3 - A Umidade na Atmosfera

A atmosfera terrestre pode reter 4% do seu volume em vapor d'água, provocando uma diminuição na intensidade dos raios solares (efeito de filtro).

A maior parte da absorção de radiação pela atmosfera ocorre por conta do vapor d'água, o qual retém a maioria das radiações na faixa das ondas longas, conforme mostra a Figura 3.3.

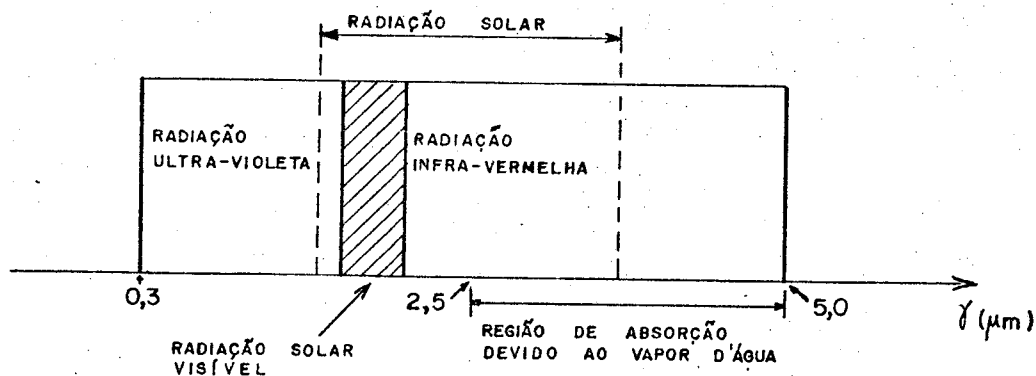


Figura 3.3 - Influência do vapor d'água na quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre^(3.8).

A quantidade máxima de vapor d'água contido na atmosfera está expressa em valores absolutos, na Tabela 3.3. Esses dados são característicos para o nível do mar e estão expressos em gramas de vapor de água por unidade de volume do ar.

Temperatura ambiente	Umidade absoluta	Temperatura ambiente	Umidade absoluta
(°C)	(g / m ³)	(°C)	(g / m ³)
05	6,797	25	23,049
10	9,401	30	30,371
15	12,823	35	39,599
20	17,300	40	51,117

Tabela 3.3 - Quantidade máxima de vapor d'água retido na atmosfera ao nível do mar

Pela observação da Tabela 3.3, conclui-se que existe um aumento significativo na quantidade máxima do vapor de água que pode ser contido pela atmosfera à medida que a temperatura cresce, vindo a contribuir para uma diminuição do aquecimento devido à radiação solar durante os períodos mais quentes. No entanto, o cálculo exato desta redução não é necessário pois já está considerado nos dados da Tabela 2.4, e os erros que poderão ocorrer nos períodos mais críticos serão sempre a favor da segurança, já que a absorção aumentará em conjunto com a temperatura ambiente.

3.4 - O Dióxido de Carbono na Atmosfera

O dióxido de carbono da atmosfera tem faixa de absorção semelhante ao vapor de água, porém a quantidade absoluta é praticamente constante.

A sua influência também já está intrínseca na Tabela 2.4 e portanto não serão feitas maiores considerações sobre o assunto.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS METEOROLÓGICOSPOR VIA COMPUTACIONAL

Com o objetivo de fornecer parâmetros meteorológicos para uma estimativa segura da capacidade de transporte em linhas de transmissão, foi aqui elaborado um método computacional para possibilitar a análise destes dados.

Para tal utilizou-se um computador IBM/360, o qual foi alimentado com dois programas efetuados em linguagem FORTRAN-IV-F e batizados como *Programa de Gravação* e *Programa de Leitura*, os quais foram utilizados para analisar a temperatura, a direção e a velocidade do vento na região de Porto Alegre.

4.1 - O Arquivo dos Dados

A fim de possibilitar o arquivo das informações sobre a temperatura, a direção e a velocidade do vento, foi elaborado um programa, chamado *Programa de Gravação*, o qual recebendo esses dados, codificados em cartões, efetua testes de consistência e posteriormente executa sua gravação em fita magnética, a qual, facilmente possibilita o acesso repetido para execução de tratamento estatístico^(4.1).

A Figura 4.1, mostra simplifcamente o fluxograma correspondente ao Programa de Gravação, o qual esta detalhado no Anexo A.1.

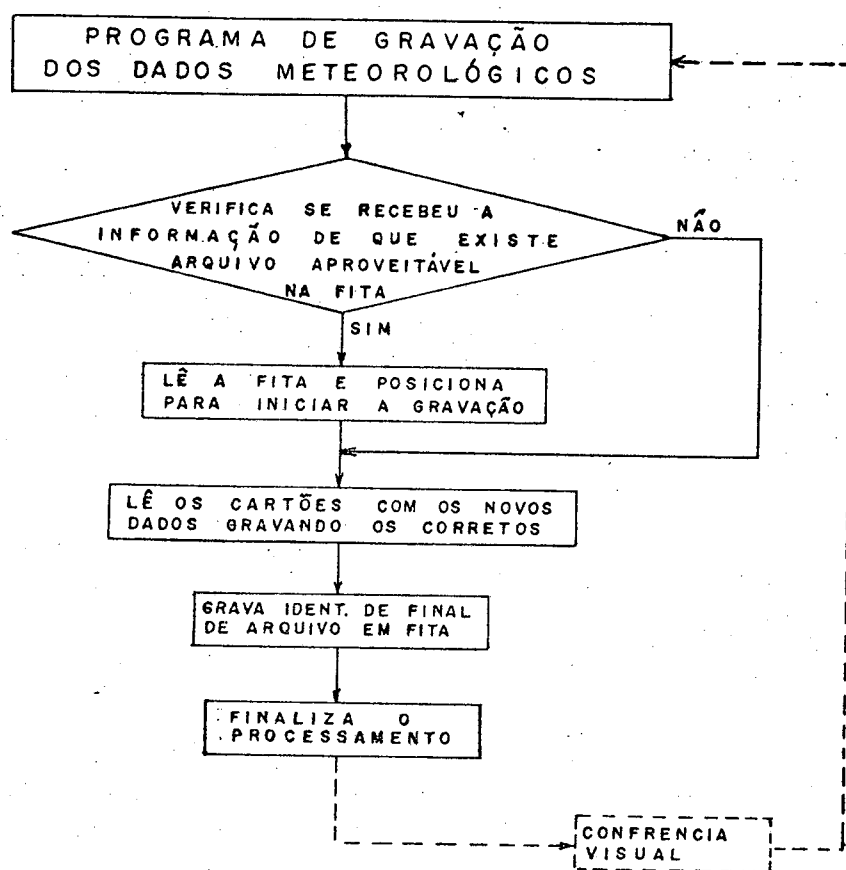


Figura 4.1 - Fluxograma simplificado correspondente ao Programa de Gravação.

Os passos básicos efetuados durante sua execução são os seguintes:

1º Passo - Lê identificação do posto meteorológico a ser processado.

2º Passo - Lê controle que estabelece se as gravações serão efetuadas a partir do início da fita magnética ou de algum ponto a ser determinado e caso a gravação for efetuada a partir do início, o programa pula para o 4º passo.

3º Passo - Lê as identificações do último arquivo a ser salvo e posiciona para gravação.

4º Passo - Lê, imprime e testa um mes de dados, gravando-os apenas se estiverem corretos.

5º Passo - Testa para saber se já foram lidos todos os dados em cartão e caso negativo retorna ao passo anterior.

6º Passo - Finaliza o processamento

Além dos testes de consistência incluídos no 5º passo é necessário uma conferência visual da temperatura, direção e velocidade do vento regravando, neste caso, também os meses subsequentes.

4.2 - A Análise Estatística dos Dados Meteorológicos Arquivados

Para a análise estatística dos dados meteorológicos gravados foi formulado um programa, chamado *Programa de Leitura*, o qual está simplificadaamente descrito no Fluxograma da Figura 4.2 e encontra-se detalhado no Anexo A.2.

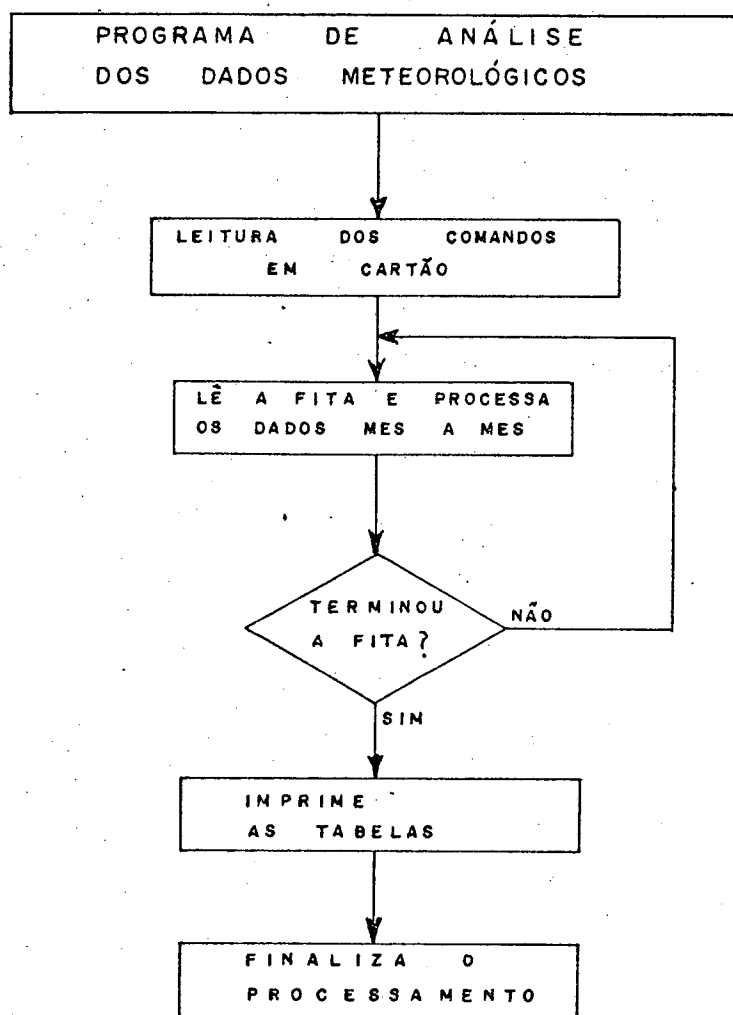


Figura 4.2 - Fluxograma simplificado correspondente ao Programa de Leitura.

Durante a execução deste programa são realizados os seguintes passos:

1º Passo - Lê em cartão as informações referentes ao processamento desejado.

2º Passo - Lê em fita magnética um mês de dados, imprimindo-os quando solicitado.

3º Passo - Armazena em forma de tabelas os dados referentes ao mês que foi lido no 2º passo.

4º Passo - Verifica se foi lido o último mês gravado, caso negativo, retorna ao 2º passo.

5º Passo - Imprime as tabelas armazenadas no 3º passo.

6º Passo - Finaliza o processamento.

Basicamente as tabelas reúnem-se em quatro grupos:

- a) Frequência acumulada da temperatura, velocidade e direção do vento, chamadas de *Tabela simples*.
- b) Frequência acumulada simultânea de dois dos parâmetros meteorológicos armazenados acima e são chamadas de *Tabela dupla*.
- c) Frequência acumulada simultânea de três dos parâmetros ou seja, *Tabela tripla*.
- d) Qualquer um dos três tipos acima em função do momento de ocorrência, sendo batizadas como: *Tabela horária simples, tabela horária dupla, etc.*

4.3 - Resultados Obtidos a Partir de Dados Coletados na Região de Porto Alegre no Estado do Rio Grande do Sul

Os dados horários de temperatura, direção e velocidade do vento, obtidos durante o ano de 1977 pelo Posto de Observação Meteorológica de Superfície, localizado no aeroporto Salgado Filho,

foram processados utilizando-se os programas de Gravação e de Leitura, estando os resultados apresentados a seguir.

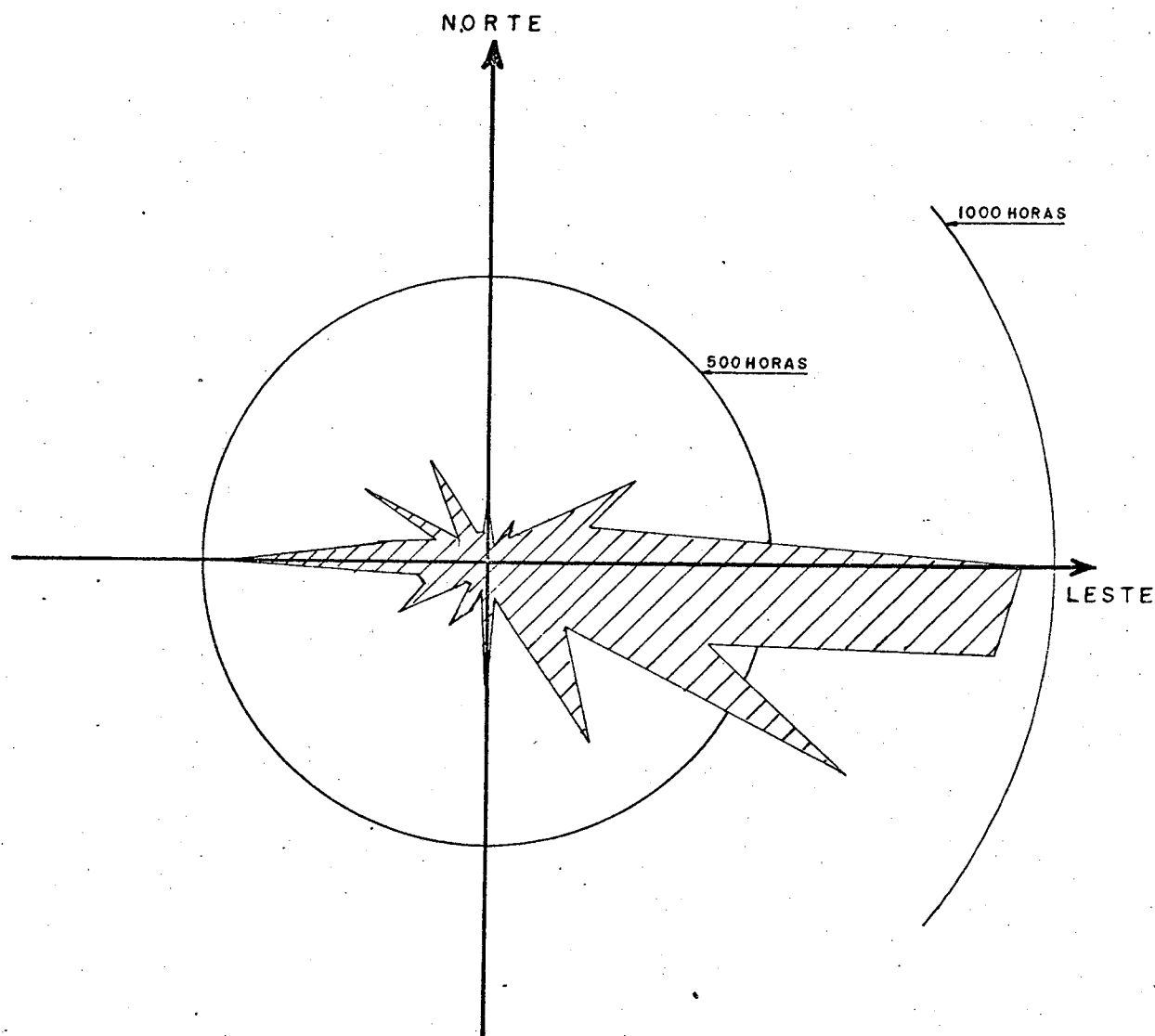


Figura 4.3 - Frequência absoluta da direção do vento na região de Porto Alegre durante o ano de 1977.

Através da observação da Figura 4.3, nota-se que, embora havendo uma significativa predominância para os ventos vindos do leste, não é possível garantir uma direção relativa com o condutor e portanto, sem monitorização da direção do vento, este deverá ser considerado sempre paralelo à linha de transmissão (pior condição de refrigeração).

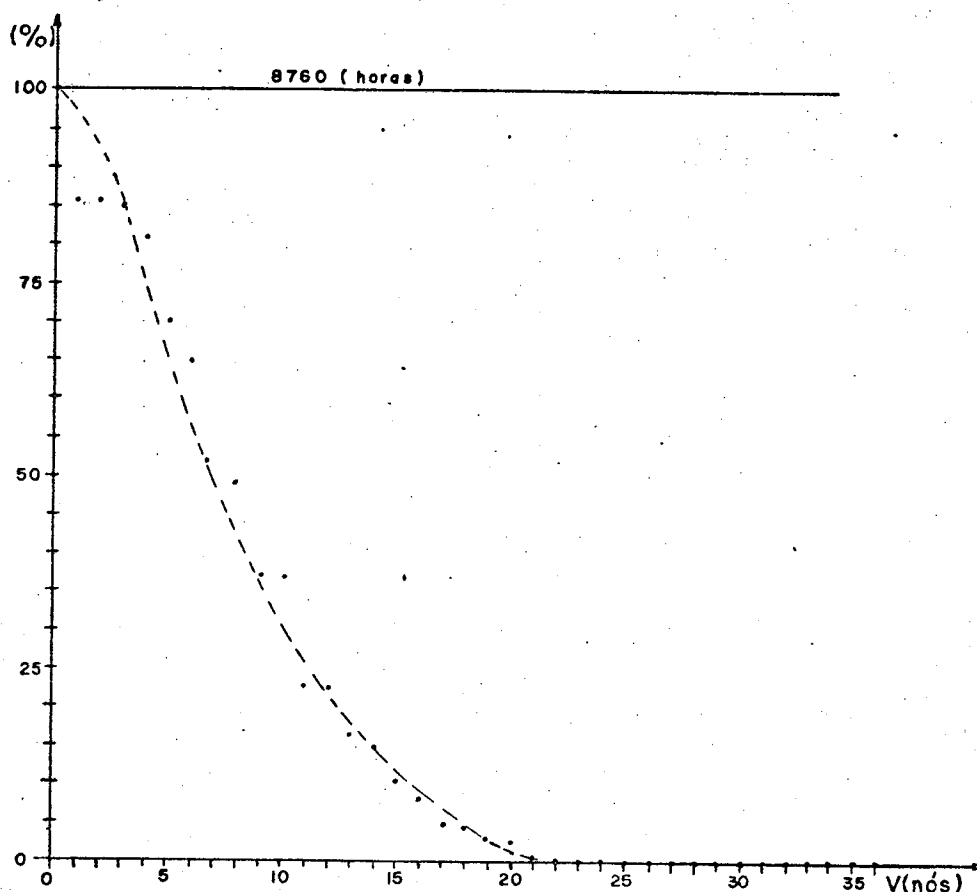


Figura 4.4 - Período de tempo em que o vento esteve com velocidade igual ou maior que a indicada.

Como a medida da velocidade do vento na faixa dos 0 aos 2 nós é muito imprecisa, as leituras abaixo deste último valor são tomadas como nulas. Por este motivo, não há continuidade no gráfico da Figura 4.4, acima dos 85% da frequência acumulada da velocidade do vento. Do mesmo modo, na Tabela 4.1, não aparecem as frequências absolutas para 1 nó.

A pior situação de refrigeração ocorreu a 27 de fevereiro às 16h com vento nulo e temperatura de $35,3^{\circ}\text{C}$.

Seria interessante fazer a curva da frequência do vento nas diferentes estações do ano e então distinguir períodos prováveis, onde a capacidade de transporte poderia ser redefinida. Porém, devido ao pequeno número de observações, apenas um ano, tal procedimento resultaria pouco consistente e por esta razão não foi efetuado.

Velocidade	Faixas de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)							
	35,1	30,1	25,1	20,1	15,1	10,1	05,1	00,1
	a 40,0	a 35,0	a 30,0	a 25,0	a 20,0	a 15,0	a 10,0	a 05,0
0	2	33	111	417	436	186	67	0
2	0	2	2	10	9	8	0	0
3	3	16	36	93	101	49	27	0
4	9	48	142	304	276	135	38	0
5	3	26	77	166	128	49	15	1
6	6	95	172	354	393	129	36	0
7	4	15	36	81	56	18	5	0
8	5	74	183	338	321	111	19	0
9	1	2	1	7	7	0	0	0
10	2	91	231	446	370	127	19	0
11	0	1	3	5	0	0	0	0
12	3	25	101	213	145	59	2	0
13	1	10	35	33	30	10	1	0
14	1	25	79	159	97	37	6	0
15	0	11	41	58	38	12	0	0
16	0	17	70	133	59	31	8	0
17	0	0	1	4	1	1	0	0
18	0	4	45	77	43	13	3	0
19	0	1	0	1	1	0	0	0
20	0	5	50	65	21	9	7	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	2	11	13	3	0	2	0
23	1	0	3	0	0	0	0	0
24	0	0	6	6	2	1	0	0
25	0	1	4	1	0	0	0	0
26	0	0	1	3	1	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	2	1	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	2	1	1	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	0	1	0	0	0

Tabela 4.1 - Frequência absoluta da velocidade
por faixas de temperatura.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA CAPACIDADE DE TRANSPORTE NOS CONDUTORESAÉREOS EM FUNÇÃO DO AQUECIMENTO

O objetivo deste capítulo é criar uma ferramenta que permita, de maneira simples, determinar a capacidade máxima de transporte de corrente, nos condutores aéreos, em função do aquecimento provocado pelos parâmetros meteorológicos.

Não foram adotados os métodos sugeridos pela literatura consultada (5.1 a 5.6), pois todos utilizam na entrada, variáveis que pouco influenciam nos resultados e já foram ou serão, neste capítulo, simplificadas.

Assim sendo, com base nos capítulos anteriores, serão efetuadas algumas simplificações procurando reduzir ao mínimo o número das variáveis, para em seguida elaborar as diretrizes de um programa de cálculo das capacidades máximas de transporte de corrente e finalmente com ele processar alguns exemplos típicos para a Região Sul do Brasil.

Novamente será utilizado para o processamento, um computador IBM/360 e a programação efetuada em linguagem FORTRAN-IV-F.

5.1 - Considerações Sobre as Variáveis que Influenciam no
Aquecimento de Condutores Aéreos Nus

Antes de iniciar a elaboração de um programa para o cálculo da corrente máxima, será efetuada neste item uma última redução no número de variáveis, procurando deixar apenas as que têm in-

fluência significativa e fixando as demais nos valores mais prováveis.

Como já foi visto, no item 2.3.2, a constante de emissividade térmica ϵ depende do meio ambiente e da idade do condutor. Tomando por base Taylor & House^(5.6), pode ser adotado $\epsilon = 0,8$ para condutores em atmosfera limpa e $\epsilon = 0,91$ quando utilizados em zonas marítimas ou industriais.

A inclusão da influência da radiação solar, se faz necessária, mesmo sabendo que no Brasil ainda não existem aparelhos de ar condicionado em número suficiente para provocar o pico da demanda nas horas de maior insolação, porém é perfeitamente viável admitir que, em consequência de restrição no transporte de energia em uma área, alguma linha de uma outra área poderá ter de transportar valores elevados de corrente durante as horas diurnas. Desta forma, deverá existir, no programa, previsão para entrada, com valores de Q_s , a fim de tornar possível o uso dos dados fornecidos pela Tabela 3.2.

Devido às mudanças de direção que normalmente ocorrem ao longo de uma linha, o sentido de incidência dos raios solares será mantido sempre na perpendicular, em relação ao eixo do condutor, resultando na simplificação da equação (2.21) para,

$$q_{s1} = a \cdot Q_s \cdot D_o \quad (W / m) \quad (5.1)$$

considerando-se portanto a condição mais desfavorável para a refrigeração.

Não foi possível abandonar a correção dos valores da energia solar recebida em função da atitude já que ignorar o incremento de 15% para os primeiros 1500m, iria provocar erros significativos em detrimento à segurança.

O coeficiente de absorção calorífica a , será 0,80 para áreas sem poluição e 0,97 para atmosferas de áreas industriais ou marítimas^(5.6), sendo que, no decorrer dos primeiros meses de uso as pequenas constantes de absorção calorífica ocasionarão, durante o dia, temperaturas mais baixas que as calculadas, vindo de certa forma compensar o erro produzido pela constante de emissividade.

A viscosidade, a densidade e a condutividade térmica do ar, situadas na faixa de temperatura do 0 aos 100°C, podem ser expressas através de fórmulas matemáticas, em substituição à Tabela 2.2, sendo, μ_f , ρ_f e k_f obtidos da seguinte forma:

$$\mu_f = ((0,000111 \cdot T_f) + 0,0416) 1,4882 \quad (\text{kg} / \text{h} \cdot \text{m}) \quad (5.2)$$

$$\rho_f = \left(\frac{(1,565 \cdot \text{ATMOSF})}{(41053 + (150 \cdot T_f))} \right) 16,02 \quad (\text{kg} / \text{m}^3) \quad (5.3)$$

onde, ATMOSF é a pressão atmosférica em (lb / pē²) e retirando-se seus valores da Tabela 5.1.

$$k_f = ((0,000227 \cdot T_f) + 0,00738) 3,2808 \quad (\text{W} \cdot \text{m} / \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (5.4)$$

Altitude (metros)	Pressão Atmosférica (lb / pē ²)
nível do mar	2116,9
1500m	1760,7

Tabela 5.1 - Pressão atmosférica em função da altitude.

Conforme já foi visto no capítulo anterior, a ocorrência de vento em todas as direções, torna obrigatório, pelo menos para o planejamento, o uso do critério da pior condição ou seja, estabelecer o vento fluindo sempre paralelo ao condutor. Desta forma, será aplicado ao valor de q_s (calor perdido por convecção) um fator de correção de 0,4^(5.7).

A mínima velocidade de vento a ser considerada será de 2pés/s, porém ressaltando que, se a adoção do vento fluindo paralelo ao condutor resultar numa refrigeração menor que a calculada sem vento, esta última será adotada como verdadeira.

Além do vento com intensidade mínima, este também será considerado assumindo valores discretos a partir de 3nós, com incrementos de 2nós, até 15nós. Como acima deste valor o tempo de ocorrência é inferior a 10%, não é válido calcular os valores das máximas correntes, possíveis de serem transportadas.

5.2 - Cálculo Computacional das Capacidades Máximas de Transporte de Corrente em Condutores CAAA Aéreos

Os limites máximos de transporte de corrente em cabos de alumínio CAAA, em função dos parâmetros meteorológicos, são obtidos através de um programa computacional, chamado *Programa do Aquecimento*, o qual está aqui resumidamente descrito e melhor detalhado no Apêndice A3.

Os principais passos executados pelo programa são:

1º Passo - Leitura dos dados do cabo e parâmetros meteorológicos, sendo aceitas faixas discretas de variação para a velocidade do vento e temperaturas ambiente e do cabo.

2º Passo - Estabelece o primeiro conjunto de parâmetros

representativos de uma situação.

3º Passo - Cálculo da corrente máxima possível de ser transportada.

4º Passo - Verifica se já foram calculadas todas as configurações solicitadas. Caso afirmativo, salta para o último passo.

5º Passo - Modifica o conjunto de parâmetros, adotando valores fornecidos e ainda não utilizados e retorna ao terceiro passo.

6º Passo - Finaliza o processamento.

5.3 - Limites Máximos de Transporte de Corrente num Cabo GROSBEAK

Empregando-se os conceitos até aqui estabelecidos, foram calculadas as temperaturas que um cabo GROSBEAK atingirá em função da corrente passante, dos parâmetros meteorológicos e dos coeficientes de emissividade e de absorção calorífica, mais prováveis de caracterizarem a pior condição de refrigeração.

A escolha dos parâmetros meteorológicos foi baseada nos resultados obtidos para a região de Porto Alegre onde a pior condição, durante o ano de 1977, ocorreu a 27 de fevereiro, às 16 horas com uma temperatura ambiente de 35°C e sem ocorrência de vento.

Para tornar possível a análise da influência da radiação solar e dos coeficientes de absorção e de emissividade de energia calorífica, escolheram-se as situações determinadas na Tabela 5.2.

Situação	Q_s (W / m ²)	ϵ	a
A	1000	0,80	0,80
B	900	0,91	0,97
C	900	0,80	0,80
D	900	0,50	0,50
E	900	0,23	0,23
F	0	0,80	-
G	0	0,50	-
H	0	0,23	-

Tabela 5.2 - Situações de Q_s , ϵ & a ,
para o estudo de suas influências so
bre as temperaturas do condutor.

Durante o processamento notou-se que, a especificação de vento de dois pés por segundo paralelo ao condutor resultava numa refrigeração menor que sendo considerado o vento nulo. Como esse erro é provocado pela imprecisão da fórmula do calor cedido por convecção forçada, todos os cálculos foram efetuados considerando-se o vento nulo, isto é, existindo apenas a convecção natural.

Os cálculos, para as situações constantes da Tabela 5.2, foram efetuados utilizando-se o programa do aquecimento, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.3.

T_c ($^{\circ}\text{C}$)	060	075	090	105	120	135	150	165	180
$ I_A $ (Amp)	246	492	653	782	894	994	1085	1169	1250
$ I_B $ (Amp)	242	501	668	803	919	1022	1117	1205	1288
$ I_C $ (Amp)	283	510	667	793	904	1002	1092	1176	1255
$ I_D $ (Amp)	320	502	637	747	843	930	1007	1080	1148
$ I_E $ (Amp)	351	496	609	703	785	859	925	987	1043
$ I_F $ (Amp)	504	652	776	883	980	1069	1151	1229	1303
$ I_G $ (Amp)	460	597	710	808	895	975	1048	1117	1181
$ I_H $ (Amp)	416	542	645	733	811	882	946	1005	1060

Tabela 5.3 - Temperatura do condutor T_c em função da corrente $|I|$, supondo-se vento nulo, temperatura ambiente de 35°C e demais parâmetros conforme a Tabela 5.2.

A influência das constantes de emissividade e de absorção caloríficas não acarretam em grandes diferenças quando as temperaturas máximas dos condutores são especificadas entre 75 e 150°C e neste caso, os valores das correntes, para $\epsilon=0,8$ e $a=0,8$, ficam próximos aos obtidos nas outras situações.

Também, nessa faixa de temperatura, a influência da radiação solar é pouco significativa, conforme pode ser verificado na Tabela 5.3, comparando as situações C, D e E com F, G e H.

A Figura 5.1 mostra o gráfico da variação da corrente $|I|$ em função da temperatura do condutor T_c para as situações C, E, F e H, escolhidas como mais representativas para o caso ora em estudo.

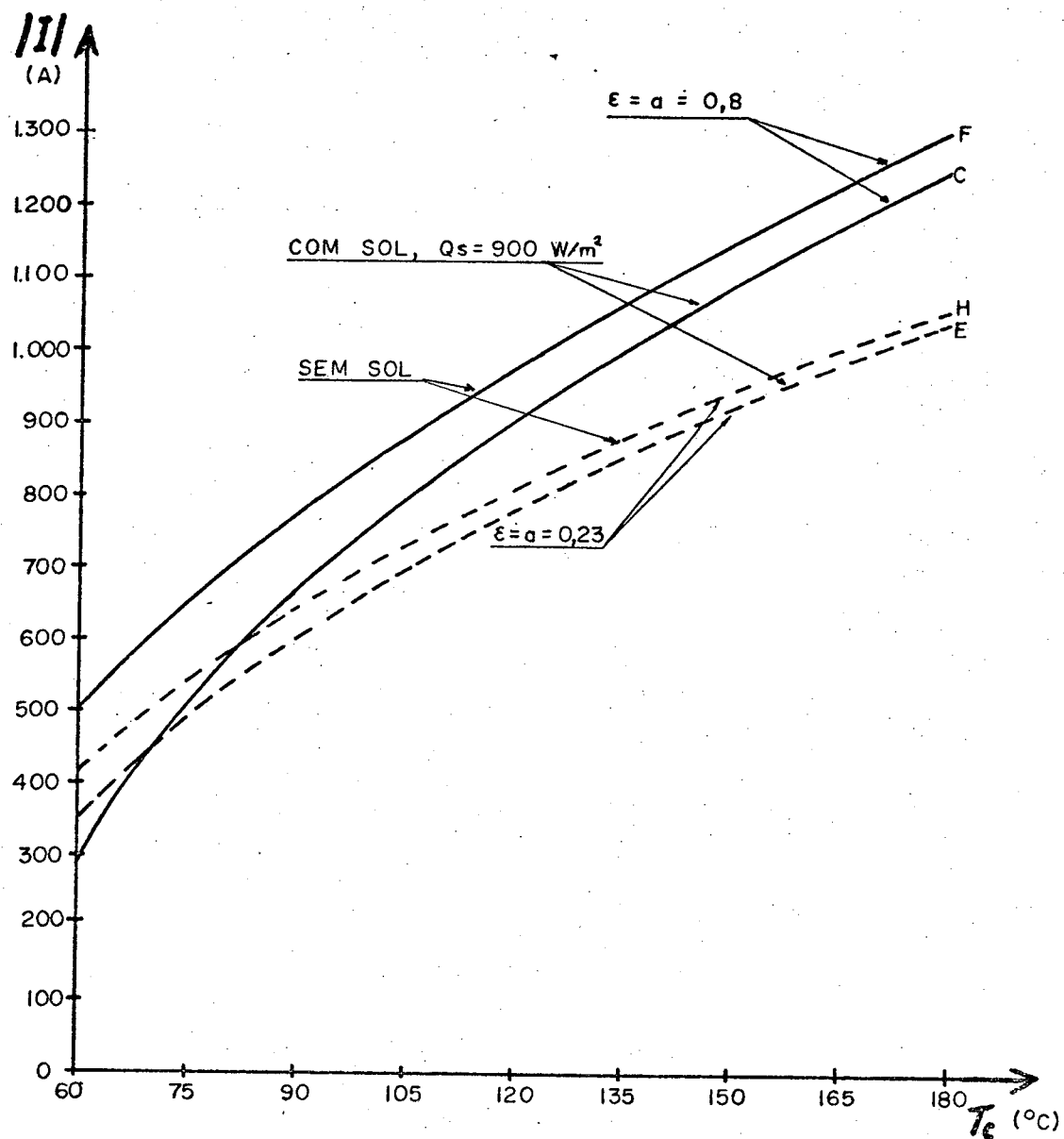


Figura 5.1 - Temperatura do condutor T_c em função da corrente $|I|$, com vento nulo (convecção natural) e temperatura ambiente de 35°C .

C A P Í T U L O 6

FIXAÇÃO DE CRITÉRIOS OPERACIONAIS QUE LIMITAM ELETRICAMENTE
A TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA EM UMA LINHA DE TRANSMISSÃO

O objetivo deste capítulo é determinar um primeiro critério que permita estabelecer qual a maior corrente viável de ser transportada numa linha de transmissão, sem levar em consideração o aquecimento dos condutores.

6.1 - Critérios Operacionais em Sistemas de Potência

A qualidade do fornecimento da energia elétrica é estabelecida em função da tensão, da frequência e da continuidade do suprimento, sendo definida como de boa qualidade quando a tensão e a frequência mantêm-se sempre na região compreendida dentro de determinados limites próximos do nominal, ao mesmo tempo que o número de interrupções não ultrapasse um valor máximo pré-fixado.

É aceitável estabelecer para a tensão, limites de variação de até dez por cento acima e abaixo do nominal. Estes valores, embora parecendo excessivamente amplos, são coerentes com as especificações da quase totalidade dos equipamentos, principalmente no que diz respeito à comutação dos transformadores de potência.

Em relação às linhas de transmissão, embora pela afirmação anterior, exista a possibilidade de utilizá-las com uma queda de tensão de 20% (ver Figura 6.1), o valor máximo comumente aceito é de 10%, pois acima deste, as perdas e a absorção de reativos tornam-se significativamente elevadas.

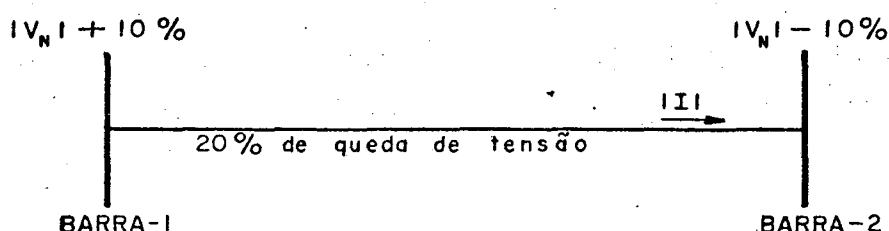


Figura 6.1 - Linha de transmissão operando com queda de tensão máxima possível devido aos equipamentos terminais, por exemplo, transformadores e capacitores.

Como a queda da tensão nas linhas de transmissão, pertencentes a sistemas a corrente alternada, depende do fluxo de potência reativa, foi escolhido para este estudo considerar a barra de chegada sempre com fator de potência unitário.

Deste modo, mantendo o fator de potência constante, é possível relacionar a queda da tensão com a diferença angular entre os terminais, pois qualquer variação da carga acarretará em alteração na potência ativa passante na linha.

Para a frequência, tem-se como normalmente aceitos os limites de $\pm 0,05\text{Hz}$ em relação à frequência nominal de 60Hz , e é um parâmetro que não produz efeito sobre este estudo.

O número de interrupções não possui um único valor comumente aceito, sendo especificado pelo planejamento em função do tipo de consumidor. Quando é considerado todo um sistema de transmissão, a tendência atual é estabelecer que, em quaisquer circunstâncias razoavelmente previsíveis, a saída de operação de qualquer elemento do sistema não deve acarretar em déficit para a demanda.

Os desligamentos, podem ocorrer devido às oscilações de potência não controláveis e estas são diretamente relacionadas com as diferenças angulares nas linhas de transmissão, sendo portanto,

também diretamente relacionadas com a queda da tensão, desde que , seja mantido o fator de potência na barra de chegada.

No caso das linhas pertencentes a regiões com configuração em anel ou em malha, a corrente necessária para ocasionar uma queda de tensão de 10% pode ser determinada isolando-a do sistema e fazendo passar carga com fator de potência unitário.

Nas linhas radiais, também é possível supor cargas com fator de potência unitário pois, na prática, dificilmente encontram-se cargas capacitivas, e a instalação de compensação até aquele valor é usualmente prevista pelos planejamentos quando for determinada a utilização máxima dos equipamentos.

Tomando por base as suposições e critérios até aqui formulados, pode-se determinar a corrente máxima operacional de uma linha de transmissão, considerando-a ligada a uma barra infinita e alimentando uma carga com fator de potência unitário a qual, conforme a Figura 6.2, produza 10% de queda de tensão.

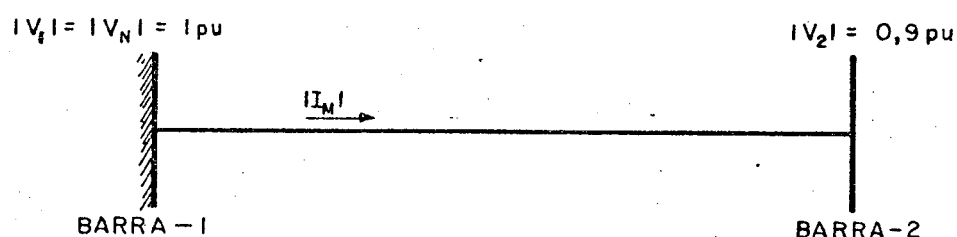


Figura 6.2 - Esquema para estabelecer a corrente máxima operacional em uma linha de transmissão. Sendo $|I_M|$ o valor eficaz da corrente passante por fase.

6.2 - Relacionamento entre a Potência Natural e a Corrente

Máxima Operacional de Linhas de Transmissão

Encontra-se cada vez mais em uso, adotar como parâmetro de planejamento, a potência natural P_O (6.1) ou, como é conhecida na língua inglesa, o SIL (surge impedance load), definido por:

$$P_O = \frac{|V_L|^2}{Z_O} \quad (W) \quad (6.1)$$

o qual se baseia na equação da potência,

$$P = \sqrt{3} \cdot |V_L| \cdot |I| \cos\phi \quad (W) \quad (6.2)$$

e na definição da corrente natural,

$$|I_O| = \frac{|V_L|}{\sqrt{3} \cdot Z_O} \quad (A) \quad (6.3)$$

onde

$$Z_O = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\Omega) \quad (6.4)$$

Como a impedância natural Z_O não depende do comprimento da linha, a corrente natural $|I_O|$ também não dependerá. E o relacionamento entre $|I_O|$ e a corrente máxima operacional pode ser visualizado no gráfico da Figura 6.3 onde estão representadas pelas curvas A e B respectivamente.

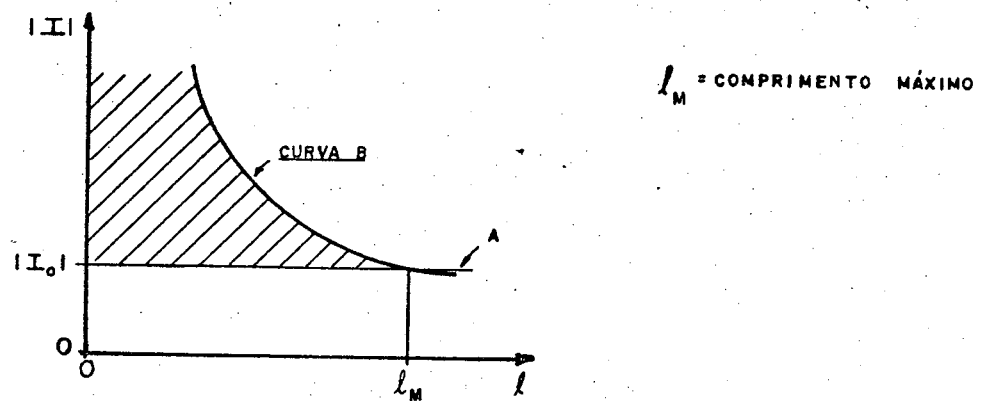


Figura 6.3 - Representação da corrente natural $|I_0|$ e da corrente máxima operacional curva B, ambos em função do comprimento de uma linha de transmissão.

Também, através da Figura 6.3, é possível estabelecer um comprimento máximo viável para um determinado tipo de linha de transmissão que interliga duas barras possuidoras de significativo apoio de geração. Em outras palavras, l_M será o maior comprimento para o qual uma linha de transmissão poderá ainda suprir radialmente uma carga razoavelmente grande.

Como na equação (6.2) o $\cos\phi = 1$, é válido escrever:

$$P_O = \sqrt{3} \cdot |V_L| \cdot |I_O| \quad (W) \quad (6.5)$$

e concluir que neste estudo, a potência natural é diretamente proporcional à corrente natural.

6.3 - Aplicação Prática

Para exemplificar o estudo desenvolvido neste capítulo, foram utilizados os parâmetros de linhas típicas de 230kV.

A fim de simplificar a construção da curva B, da Figura 6.3, foi elaborado um programa em linguagem FORTRAN - IV - F, chama

do Programa do Comprimento, tendo sido processado num computador IBM/360. Como a descrição deste programa não é relevante para o assunto aqui tratado, seus detalhes apenas serão mostrados no Apêndice A4.

Os dados de entrada foram os seguintes:

Impedância, $Z = 0,1012 + j0,5198 \text{ } (\Omega / \text{km})$

Admitância, $Y = 0,0 + j0,31871 \cdot 10^{-5} \text{ } (\text{S} / \text{km})$

Tensão na barra de saída, $|V_N| = 230 \text{ (KV fase-fase)}$

Potência natural, $P_O = 131 \text{ (MW)}$

Corrente natural $|I_O| = 328,0 \text{ (A)}$

A Figura 6.4, apresenta os resultados em forma de gráfico e no qual encontra-se ressaltado o valor do comprimento máximo $\ell_M = 276,3 \text{ (km)}$.

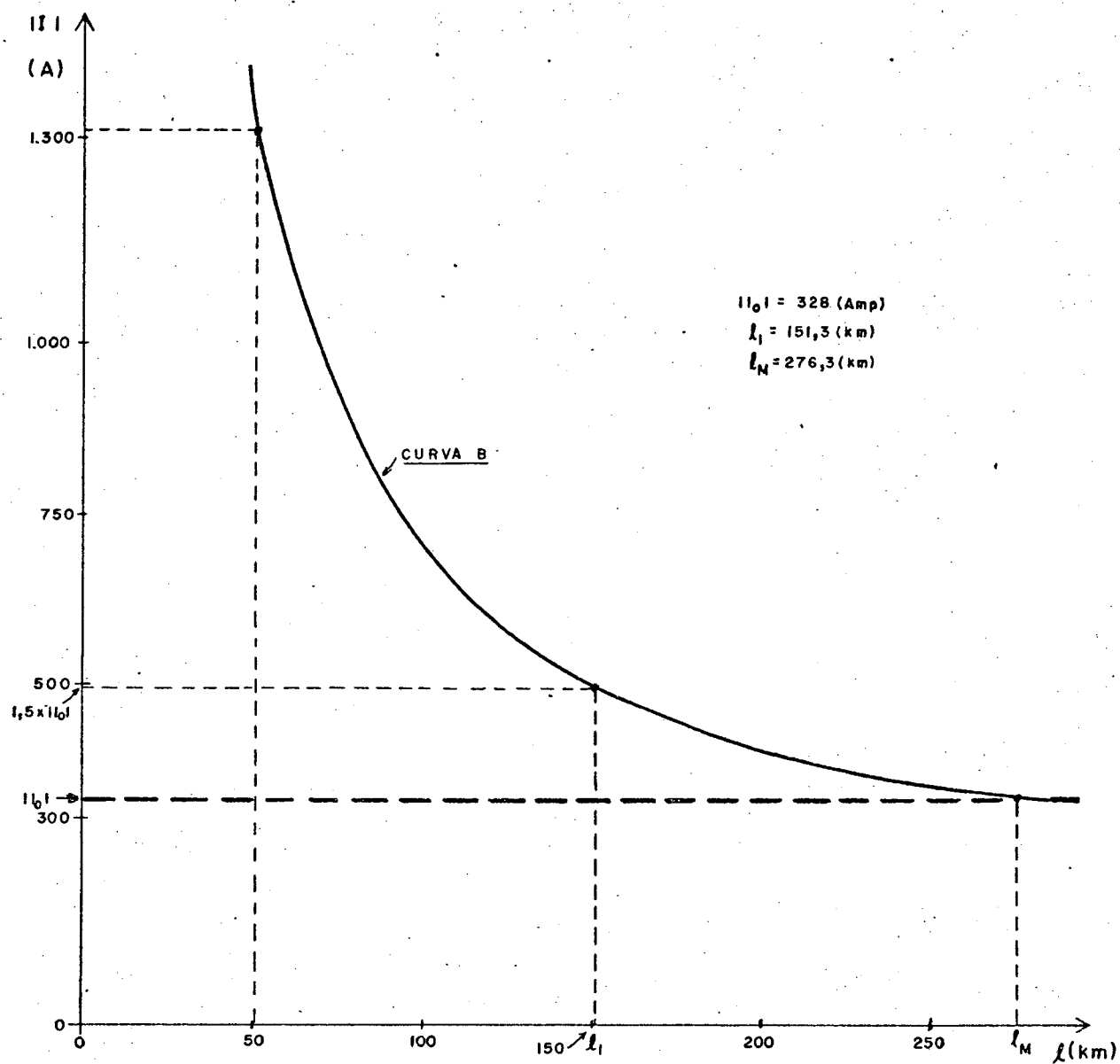


Figura 6.4 - Curva da corrente máxima possível de ser transportada em função do comprimento, para linhas típicas de 230kV.

CAPÍTULO 7

METODOLOGIA DE PLANEJAMENTO PARA DETERMINAÇÃO
DO LIMITE TÉRMICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O objetivo básico no planejamento de sistemas de potência é estabelecer medidas a serem tomadas para que o crescimento previsível na demanda, possa ser atendido continuamente e com qualidade cada vez melhor. Existindo uma busca permanente de meios que possibilitem aumentar a capacidade de transporte de energia nas linhas, citando-se entre outros, a instalação de compensação reativa e o aumento da inércia do sistema. Porém, jamais será possível, após a construção de uma linha, aumentar o limite máximo de corrente além do valor que faz os condutores atingirem o mínimo de espaçamento entre eles e o solo.

No entanto, se durante a fase de especificação dos dados para o projeto de uma linha, for determinada a quantidade máxima de corrente possível de nela circular independentemente das previsões de crescimento da demanda, evitar-se-á que no futuro apareçam restrições desnecessárias ao transporte de energia.

Por este motivo é aqui proposta uma metodologia para determinação, pelo planejamento, dos parâmetros que estabelecem em uma linha de transmissão, a máxima corrente possível de circular.

7.1 - O Planejamento do Limite Térmico de uma linha de Transmissão

Para a determinação pelo planejamento dos dados de projeto que limitarão a capacidade máxima de transporte de um tipo de linha de transmissão, será necessário acompanhar o seguinte roteiro:

1º Passo - Através de estudos de fluxo de carga, estabilidade, confiabilidade, etc, escolher o nível de tensão, tipo de torre e de cabo, mais apropriados ao sistema em questão.

2º Passo - Estabelecer a curva das máximas correntes, possíveis de serem transportadas em função das distâncias e dentro de critérios de qualidade pré-determinados. Como por exemplo os que foram apresentados no sexto capítulo.

3º Passo - Utilizando os dados meteorológicos da região, determinar a pior condição de refrigeração já ocorrida e calcular as correntes máximas em função das temperaturas viáveis para a condutor.

4º Passo - Com os dados obtidos, estabelecer as temperaturas de flexa máxima, a fim de que as linhas não ultrapassem a menor distância em relação ao solo, a qual é prevista por norma.

5º Passo - Verificar a redução na vida útil do condutor em consequência da temperatura sugerida para cada comprimento de linha de transmissão.

De uma maneira geral, o limite máximo de corrente de qualquer linha de transmissão de energia elétrica pode ser representado na Figura 7.1, porém, toda linha planejada através do método aqui formulado, terá o seu limite térmico determinado pela envoltória superior à área hachuriada.

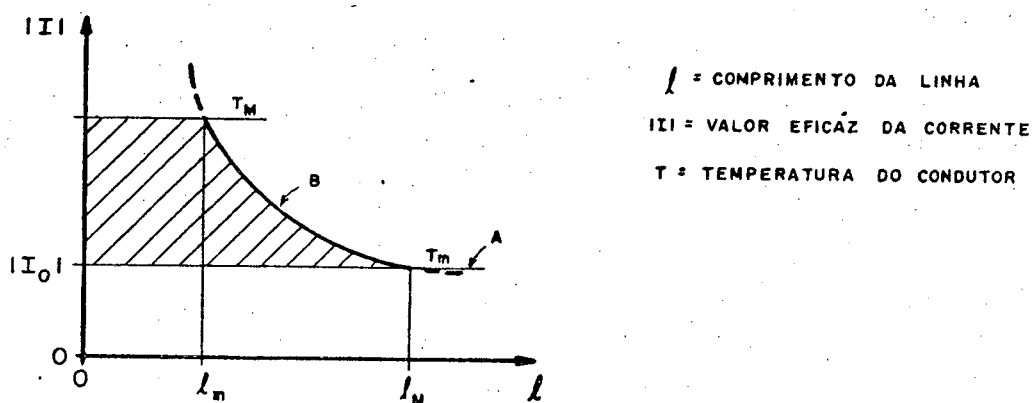


Figura 7.1 - Representação do limite térmico de um tipo de linha de transmissão em função da corrente e do comprimento.

As temperaturas (de condutor), representadas no gráfico da Figura 7.1, foram determinadas levando-se em conta a pior condição meteorológica já ocorrida na região, sendo: T_m a menor temperatura máxima que poderá ser especificada (pois não é viável construir uma linha com sua potência máxima abaixo da potência natural) e T_M é a maior temperatura aceitável para o cabo.

Ainda é possível com o gráfico da Figura 7.1, definir que: a) No cruzamento de $|I_0|$ (T_m) com a curva B (criada no capítulo 6) determinar o comprimento máximo possível para uma linha de transmissão; b) O encontro de T_M com a curva B determinará o comprimento l_m abaixo do qual não será possível aumentar a capacidade de transporte devido a limitações térmicas intrínsecas ao cabo, principalmente o estiramento plástico.

7.2 - Exemplo de Determinação da Temperatura

Máxima de Condutores Aéreos

Supondo-se que durante o planejamento de um sistema de transmissão, através de estudos de fluxo de carga, estabilidade, confiabilidade, etc, foram obtidos: o nível de tensão de 230kV, torres típicas e cabo GROSBEAK, resultando nos seguintes parâmetros elétricos:

$$Z = 0,1012 + j0,5198 \quad (\Omega / \text{km})$$

$$Y = 0,0 + j3,1871 \times 10^{-6} \quad (\text{U} / \text{km})$$

Pede-se, determinar quais as temperaturas de flexa máxima para as linhas de transmissão?

Para a solução deste problema será necessário acompanhar o roteiro sugerido no item anterior, notando-se que o 1º Passo já foi efetuado durante o posicionamento da questão.

Por outro lado, o passo número dois já foi resolvido no item 6.3, cujos resultados aparecem no gráfico da Figura 6.4.

Os valores das temperaturas em função das correntes, conforme solicitado no 3º Passo, foram obtidos no item 5.3 e aparecem na Tabela 5.3, da qual foi selecionada a situação C (Tabela 5.2 , $Q_s = 900 \text{ w} / \text{m}^2, \epsilon = 0,8$ e $a = 0,8$).

Acompanhando a sequência sugerida, e de acordo com o quarto passo, foi construído o gráfico da Figura 7.2, através do qual pode-se determinar a temperatura de flexa máxima em função do comprimento da linha.

É importante ressaltar que:

- i) Para os dados de aquecimento foi adotado a situação C da Tabela 5.2 porém, conforme já foi evidenciado no Capítulo 5, pode ser alterada em função de futuros estudos;

ii) A curva representativa do limite elétrico operacional em função do comprimento (curva B') também poderá ser modificada, pois os critérios adotados no Capítulo 6 dependem da política de planejamento de cada empresa.

Os resultados da Figura 7.2, permitem as seguintes conclusões:

- a) As linhas, com comprimento superior, a 150 km, operam com carregamento sempre abaixo de 1,5 vezes a potência natural;
- b) Para comprimentos superiores a 150 km a temperatura de flexa máxima deverá ser de pelo menos 75°C , possibilitando atingir um carregamento 1,5 vezes P_0 no caso da carga operar com fator de potência capacitivo;
- c) As linhas mais curtas que 54 km poderão ter sua temperatura de flexa máxima especificada para 180°C .

No caso de serem especificadas temperaturas superiores a 90°C deverão ser previstos os estiramentos provocados pelo recozimento do cabo (7.1 e 7.2), sendo necessário executar o último passo da sequência recomendada no item 7.1.

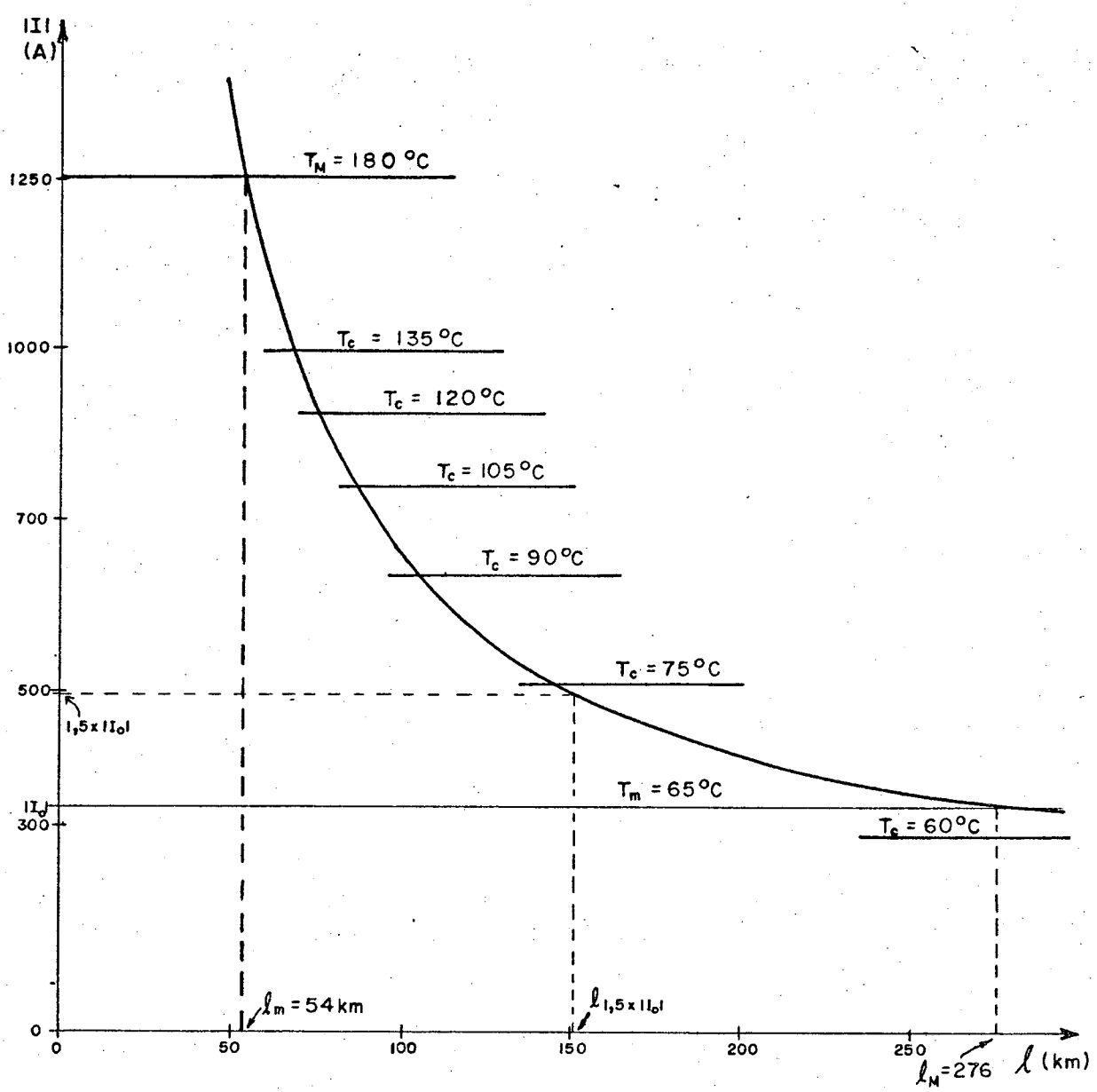


Figura 7.2 - Temperaturas máximas de projeto para linhas típicas de 230kV, com cabo GROSBEAK.

CAPÍTULO 8

ESTIMAÇÃO HORÁRIA DOS LIMITES DE CARREGAMENTO
NAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

Em complementação à metodologia sugerida no Capítulo 7 e utilizando a experiência adquirida, durante a elaboração deste trabalho, aproveitar-se-á para sugerir procedimentos que possibilitem aos despachos de carga preverem, com algumas horas de antecedência, qual o limite máximo de corrente em cada uma das linhas de transmissão.

8.1 - O Problema do Limite Térmico Variável

Após a construção de uma linha de transmissão será impossível alterar o limite máximo de corrente, na condição da maior temperatura sem vento. Porém, se durante as horas de maior refrigeração forem conhecidos os parâmetros meteorológicos, será viável aumentar os limites de transporte de energia adaptando-os às condições reinantes.

Um método preciso de monitorização em tempo real, como o sugerido por DAVIS^(8.1), além de muito dispendioso, só é aplicável em sistemas que utilizem a operação comandada por computador e em tempo real.

Por outro lado, estabelecendo margens a favor da segurança pode-se, de maneira simples e pouco dispendiosa, operar as linhas de transmissão, de um sistema de potência, com os limites térmicos variáveis.

A adoção de limites térmicos variáveis pode ser dividida do seguinte modo:

- a) Considerando apenas a variação da temperatura e da radiação solar.
- b) Determinando a refrigeração em função da direção e da velocidade do vento, além dos dois fatores do item anterior.

Em ambos os casos será necessária a assistência permanente de meteorologistas que elaborem com antecedência os parâmetros em jogo na determinação do limite térmico.

Além dos postos meteorológicos pertencentes aos Ministé - rios da Aeronáutica e da Agricultura, será necessário conhecer os dados de pressão, temperatura, direção e velocidade do vento, nas subestações, a fim de reduzir o erro decorrente das distâncias entre os postos meteorológicos e as linhas de transmissão.

8.2 - A Operação com Limite Térmico Variável

Para uma empresa de energia elétrica operar suas linhas de transmissão com limites térmicos variáveis, em função dos parâmetros meteorológicos, será necessário adotar um dos esquemas propostos no item anterior, o que significará também numa escolha de maior ou menor grau de erro, o qual é inversamente proporcional ao custo da infra-estrutura necessária.

A previsão com antecedência da direção do vento ao longo de uma linha somente será possível quando existirem significativos gradientes de pressão e consequentes ventos com direções e velocidades constantes. Deste modo, durante às horas de vento nulo e temperaturas mais baixas que a da pior condição, ainda será preciso considerar apenas a existência da convecção natural.

À medida que a temperatura diminui, aumenta a probabilidade de vento nulo (ver Tabela 4.1), o que acarreta em previsões pessimistas quando comparadas com as situações reais.

Assim sendo, pode-se concluir que, para fins de planejamento da operação de sistemas, com algumas horas de antecedência e sem equipamento para acompanhamento em tempo real, apenas será viável considerar as situações sem vento ou as de ventos predominantes.

CAPÍTULO 9

Os fatos detetados através do presente estudo sugerem que as temperaturas máximas comumente especificadas para os cabos, podem ser elevadas. Os novos valores dependerão de uma adequação do presente estudo as condições particulares de cada empresa.

Desta forma, admitindo-se uma temperatura máxima de, digamos, 150°C , esta deverá ocorrer apenas durante as situações de emergência, como por exemplo, um circuito remanescente suportando a carga que normalmente é transportada por uma linha dupla. Este critério resultaria numa temperatura máxima normal de operação de menos de 90°C , onde o recozimento é desprezível, sendo o envelhecimento calculado em função das saídas previstas pelos estudos de confiabilidade em conjunto com os levantamentos estatísticos dos dados meteorológicos da região.

Assim sendo, uma boa política para a escolha do limite térmico das linhas de transmissão, durante o planejamento, pode beneficiar em muito as empresas de energia elétrica principalmente devido ao sensível aumento na capacidade de transporte.

Por outro lado, o aumento da temperatura de operação dos condutores é um problema que requer maiores estudos para a especificação de limites térmicos superiores a 120°C , pois as pesquisas descritas nas referências bibliográficas ainda o são em pequeno número e algo controversas.

O estudo feito, torna evidente a possibilidade de transmitir maiores quantidades de energia utilizando-se para isso as horas de temperaturas ambientes mais baixas. Desta forma, as linhas projetadas e construídas de acordo com os critérios vigentes, podem ter seu modo de operação alterado sem infringência dos critérios de

projeto (temperatura do cabo e flexa máxima vertical) desde que sejam levados em consideração as condições meteorológicas. Mesmo se, os únicos parâmetros meteorológicos monitorizados forem a temperatura ambiente e a insolação, considerando sempre o vento nulo, isto dará uma idéia mais precisa sobre os limites máximos de corrente.

Não foram estudados os efeitos que carregamentos maiores ocasionariam sobre a confiabilidade a estabilidade e as perdas.

Os dados meteorológicos analisados referentes à localidade de Porto Alegre abrangeram apenas um ano, não sendo portanto suficientes para uma análise estatística. No entanto, os programas desenvolvidos poderão ser usados para uma análise desse tipo a partir do momento em que forem supridos de dados estatisticamente representativos. Entretanto, para fins de planejamento a norma específica que seja utilizada uma condição ambiental determinada. Já, para fins de operação, dever-se-ia proceder uma análise estatística para determinação da possibilidade de ocorrência das diferentes condições meteorológicas.

Verificou-se ainda, durante o estudo da bibliografia, que já foi desenvolvido, pela Reynolds Metals Company, um cabo semelhante ao CAAA e chamado SSAC (Steel Supported Aluminum Conductor) ^(9.1) o qual, devido a têmpera dos condutores de alumínio, pode suportar temperaturas mais elevadas e com flexas bem menores que as do CAAA.

Ficam como sugestões para futuros trabalhos, os seguintes temas:

- Analisar meteorologicamente a região de Porto Alegre para um maior número de anos;
- Avaliar economicamente as consequências do aumento da capacidade de transporte de energia, principalmente no que se refere ao aumento da altura das torres;

- Influência do maior carregamento dos condutores nos critérios de confiabilidade;
- Realimentar periodicamente as hipóteses formuladas neste estudo, com base na experiência da operação;
- Determinação experimental das constantes de emissividade e de absorção caloríficas mais prováveis de ocorrer nas regiões onde forem passar as linhas;
- Estudar em profundidade a influência de temperaturas e levadas na diminuição da vida útil dos condutores.

BIBLIOGRAFIA

- 1.1 - "The Electric Century 1874-1974: Transmission". Electrical World, Volume 181, Nº 11 (1, junho 1974), McGraw-Hill, p.115.
- 1.2 - BEERS, G.M. et alii. "Transmission Conductor Ratings". AIEE Trans. Vol. PAS-81, Nº 10 (outubro 1963), pp.767 - 775.
- 2.1 - ADAMS, W.H. Transmisión de Calor. 3^a edição. Madrid: McGraw-Hill Book Company, INC, 1964.
- 2.2 - DAVIS, M.W. "A New Thermal Rating Approach: The Real Time Thermal Rating System for Strategic Overhead Conductor Transmission Lines, Part II: Steady State Thermal Rating Program". IEEE Trans. Vol. PAS-96, Nº 03 (maio/junho 1977), pp.810-825.
- 2.3 - DAVIS, M.W. "Nomographic Computation of the Ampacity Rating of Aerial Conductors". IEEE Trans. VOL. PAS-89, Nº 03 (março 1970); pp.387-399.
- 2.4 - HOUSE, H.E. & TUTTLE, P.D. "Current-Carrying Capacity of ACSR". AIEE Trans. Vol. PAS-77, Nº 02 (fevereiro 1959), pp.1169-1177.
- 2.5 - Tourinho, PLÍNIO A.M. Tratado de Astronomia. 1^a edição. Volume 1. Curitiba: Gráfica Mundial, Ltda. 1950.

- 3.1 - BLAIR, T.A. Meteorologia 1^a edição. Rio de Janeiro : Ao livro Técnico S.A. 1964.
- 3.2 - CHEDE, F.C. Manual de Meteorologia Aeronáutica. 2^a edição. Rio de Janeiro: ETA. Editora Técnica de Avaliação , LTDA, 1976.
- 3.3 - PUTNAM, P.C. Power From The Wind. 1^a edição. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1948.
- 3.4 - DAVIS, M.W. "A New Thermal Rating Approach: The Real Time Thermal Rating System for Strategic Overhead Conductor Transmission Lines, Part I: General Description and Justification of the Real Time Thermal Rating System". IEEE Trans. VOL. PAS-96, Nº 3 (maio/junho 1977), pp.803-809.
- 3.5 - BEERS, G.M.; GILLIGAN, S.R; LIS, H.W. & SCHAMBERG, J.M. "Transmission Conductor Ratings". AIEE Trans. VOL. PAS-81, Nº 10 (outubro 1963), pp.767-775.
- 3.6 - GORUB, J.C. & WOLF, E.F. "Load Capability of Bare ACSR and ALL-Aluminum Conductors Based on Long-Time Outdoor Temperature Rise Tests". AIEE Transactions (dezembro 1963), pp. 852-857.
- 3.7 - HOUSE, H.E. & TUTTLE, P.D. "Corrent-Carrying Capacity of ACSR". AIEE Trans. VOL. PAS-77, Nº 02 (fevereiro 1959), pp.1169-1177.

- 3.8 - DAVIS,M.W. "A New Thermal Rating Approach: The Real Time Thermal Rating System for Strategic Overhead Conductor Transmission Lines, Part III: Steady State Thermal Rating Program Continued-Solar Radiation Considerations" . IEEE Trans. VOL. PAS-97, Nº 2 (março/abril 1978) , pp.444-455.
- 4.1 - GOLDEN,James T. Fortran IV: Programming and Computing. 1^a edição. Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall,Inc.1965
- 5.1 - HOUSE,H.E. & TUTTLE,P.D. "Current-Carrying Capacity of ACSR. AIEE Trans. VOL. PAS-77. Nº 02 (fevereiro 1959), pp.1169-1177.
- 5.2 - STINEMAN,R.W. & McINTYRE,G.W. "Calculation of Steady-State and Transient Rating of Electric Wire" AIEE Trans. VOL. PAS-79, Nº 02 (fevereiro 1961), pp.1157-1164.
- 5.3 - BEERG,G.M. ; GILLIGAN,S.R.; LIS,H.W. & SCHAMBERGER,J.M."Transmission Conductor Ratings".AIEE Trans. VOL. PAS-81. Nº 10 (outubro 1963); pp.767-775.
- 5.4 - GORUB,J.C. & WOULF,E.F. "Load Capability of Bare ACSR and All-Aluminum Conductors Based on Long-Time Outdoor Temperature Rise Tests". AIEE Trans. VOL. PAS-81, Nº 12 (dezembro 1963); pp.852-857.
- 5.5 - DAVIS,M.W. "Nomographic Computation of the Ampacity Rating of aerial Conductor".IEEE Trans. VOL. PAS-89, Nº 03 (março 1970); pp.387-399.

- 5.6 - TAYLOR, C.S. & HOUSE, H.E. "Emissivity and Its Effect on the Current-Carrying Capacity of Stranded Aluminum Conductors". AIEE Trans. VOL. PAS-74, Nº 10 (outubro 1956) pp.970-976.
- 5.7 - DAVIS, M.W. "A New Thermal Rating Approach: the Real Time Thermal Rating System for Strategic Overhead Conductor Transmission Lines, Part II: Steady State Thermal Rating Program". IEEE Trans. VOL. PAS-96, Nº 03 (maio / junho 1977), pp.810-825.
- 6.1 - FUCHS, Rubens D. Transmissão de Energia Elétrica. Volume I e II. 1ª edição. Itajubá: Livros Técnicos e Científicos Editora Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1977.
- 7.1 - HARVEY, John R. & LARSON, R.E. "Use of Elevated-Temperature Creep Data in Sag-Tension Calculations". IEEE Trans. VOL. PAS-89, Nº 03 (março 1970), pp.380-386.
- 7.2 - HARVEY, J.R. "Effect of elevated Temperature Operation on The Strength of Aluminum Conductors". IEEE Trans. VOL. PAS-91, Nº 05 (setembro / outubro 1972), pp.1769-1772.
- 8.1 - DAVIS, M.W. "A New Thermal Rating Approach: The Real Time Thermal Rating System for Strategic Overhead Conductor Transmission Lines, Part I: General Description and Justification of the Real Time Thermal Rating System". IEEE Trans. Volume PAS-96, Nº 03 (maio / junho 1977), pp.803-809.
- 9.1 - DENHAM, D. et alii. "Steel Supported Aluminum Conductor Increases Line Ampacity". Transmission & Distribution. Vol. 30, Nº 9 (setembro 1978), pp. 40-41.